

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE TECNOLOGIA DE JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

ADRIANO KOLLROSS

CONSTRUÇÃO DE DINAMÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE TORQUE E
POTÊNCIA DE MCI DE PEQUENO PORTE

Joinville
2016

ADRIANO KOLLROSS

CONSTRUÇÃO DE DINAMÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE TORQUE E
POTÊNCIA DE MCI DE PEQUENO PORTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Automotivo no Curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador:
Prof. Dr. Eng. Anderson Wedderhoff Spengler

Joinville
2016

ADRIANO KOLLROSS

CONSTRUÇÃO DE DINAMÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE TORQUE E
POTÊNCIA DE MCI DE PEQUENO PORTE

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Automotivo e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 08 de dezembro de 2016.

Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca examinadora:

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr. Eng.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Diego Santos Greff, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wellington Roque, Dr. Eng.
Faculdade de Tecnologia de Indaiatuba

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por orientar e sustentar meus passos em todos os momentos.

Aos meus pais Adolar Kollross e Aglaci Stanchak que sempre me proporcionaram condições emocionais e financeiras para meu desenvolvimento como pessoa e como profissional. Seus esforços e sacrifícios eu jamais serei capaz de recompensar.

Ao meu orientador Anderson Wedderhoff Spengler pela atenção, dedicação e disposição na orientação do trabalho.

A Equipe de Eficiência Energética – Eficem, da qual fiz parte por um ano durante a graduação, por ceder os materiais e o espaço para desenvolvimento do trabalho.

A todos os amigos que a vida me proporcionou durante a graduação e que foram incentivadores do meu crescimento.

“E tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração, como ao Senhor, e não aos homens, sabendo que recebereis do Senhor o galardão da herança, porque a Cristo, o Senhor, servis.

(Cl 3:23-24)

RESUMO

Existem vários modelos de dinamômetros, embora todos utilizem o mesmo conceito para o seu funcionamento, neste trabalho optou-se projetar e construir um dinamômetro de fricção com objetivo de gerar as curvas de torque e potência de um motor de pequeno porte. O sistema foi dimensionado para um motor da Honda, modelo GX-35 de 35,8 cilindradas, 1,9 Nm de torque máximo e 1,2 kW de potência máxima. Foi desenvolvido um sistema eletrônico de aquisição de dados de rotação e de força, para que fossem obtidos os dados e traçadas as curvas de torque e potência do motor. Foi utilizada a plataforma Tiva™ C Series da Texas Instruments, um conversor analógico-digital HX711, um sensor indutivo Balluff modelo BES 516-325-G-S4-C e uma célula de carga da International Weighing Manufacture (IWM) com capacidade de 10 kg. Os resultados obtidos a partir de quatro testes realizados com o sistema foram o torque variando entre 1,4 a 6 Nm e a potência variando entre 0,8 e 2,5kW. Pode-se concluir que o sistema construído foi capaz de fornecer dados para que se obtivesse conhecimento a respeito do motor e assim gerar as suas curvas de torque e potência, alcançando os objetivos do trabalho.

Palavras-chave: Dinamômetro. Torque. Potência.

ABSTRACT

There are several models of dynamometers, although all of them use the same concept for its operation, in this work it was decided to project and build a friction dynamometer in order to generate the torque and power curves of a small engine. The system was dimensioned for a Honda motor, model GX-35 with 35.8cm³ of cylinder capacity, 1.6Nm of maximum torque and 1.2kW of maximum power. It was developed an electronic system of data acquisition to rotation and force, in order to obtain the data and generate the torque and power curves of the motor. It was used a Tiva™ C Series platform from Texas Instruments, an HX711 analogic-digital conversor, a Balluff inductive sensor model BES 516-325-G-S4-C and a load cell from International Weighing Manufacture (IWM) with 10 kg of capacity. The obtained results of four tests performed with the system was a torque varying between 1.4 and 6 Nm and a power varying between 0.8 and 2.5kW. We can conclude that the built system was capable to provide the data in order to obtain knowledge about the motor and then generate the torque and power curves, reaching the objectives of the work.

Keywords: Dynamometer. Torque. Power.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxos de massa e energia em um MCI.	14
Figura 2. Motor de combustão interna de ignição por centelha.	15
Figura 3. Curvas características dos motores ou veículos automotivos.	16
Figura 4. Sistema pistão-biela-manivela.	17
Figura 5. Conjunto para monitorar rotação em veículo comercial.	18
Figura 6. Roda fônica do motor GX-35 utilizada para determinação da rotação.	19
Figura 7. Princípio do freio dinamômetro	20
Figura 8. Esquema de funcionamento do sensor indutivo.	21
Figura 9. Sistema de aquisição de dados.	22
Figura 10. Curva característica do gráfico de tensão por deformação de materiais dúcteis.	23
Figura 11. Ponte de Wheatstone utilizado em célula de carga.	23
Figura 12. Posicionamento dos strain-gages na célula de carga.	24
Figura 13. Conversão de sinal analógico para digital por um conversor A/D.	25
Figura 14. Precisão na conversão de sinal analógico para digital.	25
Figura 15. Curvas de torque e potência do motor Honda GX35 fornecidas pelo fabricante.	28
Figura 16. Sinal onda quadrada ideal.	29
Figura 17. Circuito divisor de tensão.	29
Figura 18. Peça de acoplamento com o motor.	30
Figura 19. Peça superior do conjunto de fricção.	30
Figura 20. Peça inferior do conjunto de fricção.	30
Figura 21. Braço de alavanca	31
Figura 22. Base da célula de carga.	32
Figura 23. Montagem do projeto mecânico do dinamômetro.	32
Figura 24. Bancada de testes	33
Figura 25. Especificações dimensionais da célula de carga utilizada.	34
Figura 26. Especificações técnicas da célula de carga utilizada.	35
Figura 27. Componentes do sistema de aquisição de força.	37
Figura 28. Máquina de estados da programação em LabView.	39
Figura 29. Interface LabView para visualização dos dados.	41
Figura 30. Imagem de osciloscópio do sinal do sensor de rotação.	44
Figura 31. Dados de calibração da célula de carga utilizando o sensor Pasco 2104.	45
Figura 32. Dados de rotação do primeiro teste.	46

Figura 33. Dados de torque do primeiro teste.	47
Figura 34. Sinal esperado do sensor magnético tipo pick-up.	48
Figura 35. Dados de rotação do primeiro teste corrigidos.	48
Figura 36. Gráfico de torque por rotação obtido no primeiro teste.	49
Figura 37. Gráfico de potência por rotação obtido no primeiro teste.	50
Figura 38. Curvas de rotação e força do segundo teste.	51
Figura 39. Curva de torque obtida no segundo teste.	51
Figura 40. Curva de potência vs rotação obtida no segundo teste.	52
Figura 41. Resultado final do segundo teste.	53
Figura 42. Curvas de rotação e força do terceiro teste.	54
Figura 43. Curva de torque do terceiro teste.	54
Figura 44. Curva de potência do terceiro teste.	55
Figura 45. Curvas de rotação e força do quarto teste.	56
Figura 46. Curvas de torque do quarto teste.	56
Figura 47. Curvas de potência do quarto teste.	57
Figura 48. Curvas de torque e potência do quarto teste.	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	14
2.1.1	Curvas características	16
2.1.2	Torque em MCI	16
2.1.3	Rotação	18
2.2	DINAMÔMETRO	19
2.3	SENSOR DE ROTAÇÃO	20
2.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA	21
2.4.1	Célula de carga.....	22
2.4.2	Conversor analógico-digital.....	24
2.4.3	Microcontroladores e plataformas de prototipagem.....	25
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	27
3.2	SENSOR DE ROTAÇÃO	28
3.3	PROJETO MECÂNICO DO DINAMÔMETRO.....	29
3.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA E ROTAÇÃO	33
3.5	TIVA™ C SERIES LAUNCHPAD	33
3.6	CONVERSOR A/D	33
3.7	CÉLULA DE CARGA	34
3.8	AQUISIÇÃO DE ROTAÇÃO.....	35
3.9	AQUISIÇÃO DE FORÇA.....	36
3.10	INTERFACE LABVIEW	38
3.11	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO.....	41
3.12	ALGORITMO DO MICROCONTROLADOR	42

3.13	MÉTODO PARA ENSAIO DE MOTORES	42
4	RESULTADOS	44
4.1	VERIFICAÇÃO DO SENSOR DE ROTAÇÃO.....	44
4.2	CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA	45
4.3	TESTES COM MOTORES	46
4.3.1	Primeiro teste	46
4.3.2	Segundo teste.....	50
4.3.3	Terceiro teste.....	53
4.3.4	Quarto teste	55
4.4	RESUMO E COMENTÁRIOS DOS TESTES	58
5	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICE A – Códigos Do Microcontrolador	63

1 INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna são máquinas térmicas usadas há muitos anos nas mais diversas aplicações pelas vantagens que se tem em termos de tamanho, peso e capacidade de produzir trabalho de eixo. Para conhecimento das propriedades de um motor se faz necessária a utilização de instrumentos de medição a fim de quantificar os parâmetros deste, por exemplo, o torque e a potência que são entregues no eixo de saída.

Dinamômetro é o nome dado ao dispositivo utilizado para quantificar os dados de rotação, torque e potência de motores. Esse dispositivo já utilizado há muito tempo possui diversas maneiras de ser construído, utilizando simples atrito, sistemas hidráulicos ou sistemas elétricos, por exemplo.

A principal motivação desse trabalho é a construção de um dispositivo capaz de medir rotação, torque e potência de um motor de baixa cilindrada e gerar as curvas de torque e potência do mesmo. O motor a ser testado é do modelo GX-35 produzido pela Honda, o qual é aplicado em um veículo desenvolvido por estudantes.

O veículo é um protótipo automotivo desenvolvido pela equipe Eficem, composta de estudantes da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville¹. Tem estrutura monocoque construída em fibra de carbono, possui três rodas e tem capacidade para uma pessoa.

1.1 OBJETIVOS

Nessa seção são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Construir um sistema de medição capaz de gerar as curvas de torque e potência de motores de combustão interna de pequeno porte.

¹ Projeto de Extensão desenvolvido para a Maratona Universitária de Eficiência Energética, a qual ocorre em São Paulo – SP. Estudantes de todo o país desenvolvem protótipos que atendem o regulamento da competição e buscam, com eles, obter o menor consumo de energia percorrendo um circuito determinado. O projeto foi coordenado pelo Prof. Dr Diego Santos Greff, realizado no período de agosto até novembro de 2014, que contou com a colaboração de 10 acadêmicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Projetar e construir o sistema mecânico de transmissão de torque do motor para uma célula de carga e montar o sistema em uma bancada para testes;
- ✓ Implementar e calibrar uma célula de carga para medição da força fornecida pelo motor ao sistema mecânico utilizando um conversor analógico-digital de sinal e uma plataforma de prototipagem Tiva™ C Series Launchpad da Texas Instruments;
- ✓ Implementar um sensor indutivo para medição de rotação do motor;
- ✓ Programar o microcontrolador para aquisição e tratamento dos dados de força e rotação para e geração de dados de saída (curva de torque e potência do motor);
- ✓ Desenvolver uma interface em LabView para visualização das curvas de torque e potência após realização dos testes;

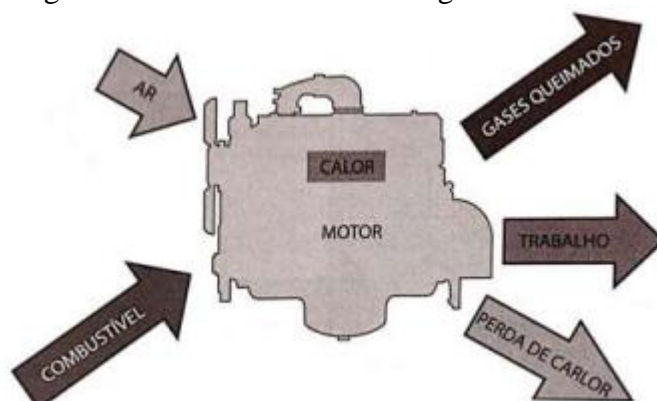
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. São descritos os conceitos fundamentais relacionados à célula de carga, conversor analógico-digital (A/D), microcontroladores e plataformas de prototipagem. São abordados ainda conceitos sobre motores de combustão interna, sensores de rotação e dinamômetros. O conjunto de assuntos abordados deu suporte para o desenvolvimento dos sistemas, tanto mecânico quanto eletrônico, para aquisição dos dados de torque e rotação do motor, sendo possível o posterior cálculo de potência.

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas que geram energia mecânica a partir da queima de porções da mistura combustível/ar e da consequente expansão dos gases que ocorre em função da elevação da pressão no interior da câmara de combustão, transformando assim a energia térmica (calor) em trabalho mecânico (Figura 1).

Figura 1. Fluxos de massa e energia em um MCI.



Fonte: (BRUNETTI, 2012).

Entre as principais características que diferem os motores, está o ciclo termodinâmico podendo o MCI operar segundo o ciclo OTTO, em que a ignição do combustível ocorre através da faísca gerada pela vela, ou o ciclo Diesel, no qual ocorre a ignição espontânea, devido à alta pressão e temperatura no interior da câmara de combustão (BRUNETTI, 2012).

Os MCIs variam ainda quanto à forma de se obter o trabalho mecânico, onde os principais modelos são classificados como motores rotativos, motores de impulso e motores alternativos. No motor alternativo, objeto deste estudo, o trabalho é obtido pelo movimento de sobe e desce do pistão, no interior do cilindro, que acoplado ao sistema biela-manivela, transmite ao virabrequim um movimento rotativo (Figura 2).

Figura 2. Motor de combustão interna de ignição por centelha.



Fonte: Adaptado de Padilha (2007).

Padilha (2007) lista os componentes do motor numerados na Figura 2 como:

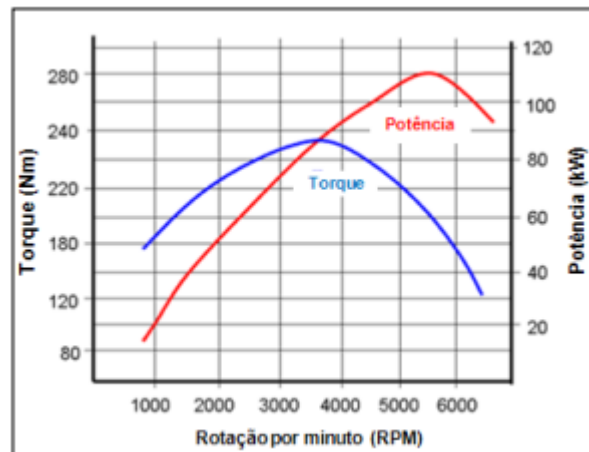
1. Pistão;
2. Biela;
3. Virabrequim;
4. Anéis de vedação;
5. Comando de válvulas;
6. Válvula de admissão;
7. Válvula de escape;
8. Coletor de escape;
9. Cabeçote;
10. Cilindro;
11. Bloco;
12. Coletor de admissão.

2.1.1 Curvas características

O torque e a potência mecânica de um motor ou veículo automotivo são representados por suas curvas características. Essas curvas mostram a variação do torque e da potência em função da velocidade de rotação e são geradas a partir de testes em dinamômetros mantendo a carga constante, isto é, com a borboleta completamente aberta. Durante o ensaio é obtido o torque resistente do dinamômetro, que corresponde ao torque do motor, e a potência é calculada a partir deste parâmetro (MARTINS, 2006).

A Figura 3 apresenta um exemplo das curvas características de torque (curva em azul) e potência mecânica (curva em vermelho) de motores ou veículos automotivos, em função da velocidade de rotação.

Figura 3. Curvas características dos motores ou veículos automotivos.

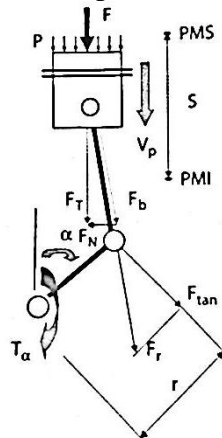


Fonte: (GONÇALVES, 2013).

2.1.2 Torque em MCI

A Figura 4 mostra o sistema pistão-biela-manivela de um motor alternativo formando o mecanismo responsável pelo estabelecimento de um momento torçor em seu eixo de manivelas composta por F_r e pela força normal.

Figura 4. Sistema pistão-biela-manivela.



Fonte: (BRUNETTI, 2012).

A força F resultante no pistão composta pela força F_r e pela força normal F_n transmite-se à biela e desta à manivela, dando origem a um momento instantâneo no eixo do motor.

A força de pressão F depende da posição angular da manivela e, portanto, a F_{tan} é variável. Logo, apesar de o braço r ser fixo, o momento no eixo do motor varia com o ângulo (α), medido a partir da posição em que as manivelas estão alinhadas, gerando o menor volume entre a cabeça do pistão e o cabeçote, estabelecendo o denominado ponto morto superior – PMS – do mecanismo de biela e manivela (BRUNETTI, 2012).

Com o motor em funcionamento, obtém-se um momento torçor médio positivo, popularmente denominado torque, indicado por T . Desprezando outros efeitos, a força F aplicada no pistão é função da pressão “ P ” gerada pela combustão e esta, é função da rotação e da massa de mistura ar-combustível disponibilizada para a combustão (carga). Isso permite que o torque varie com a rotação e carga. (BRUNETTI, 2012).

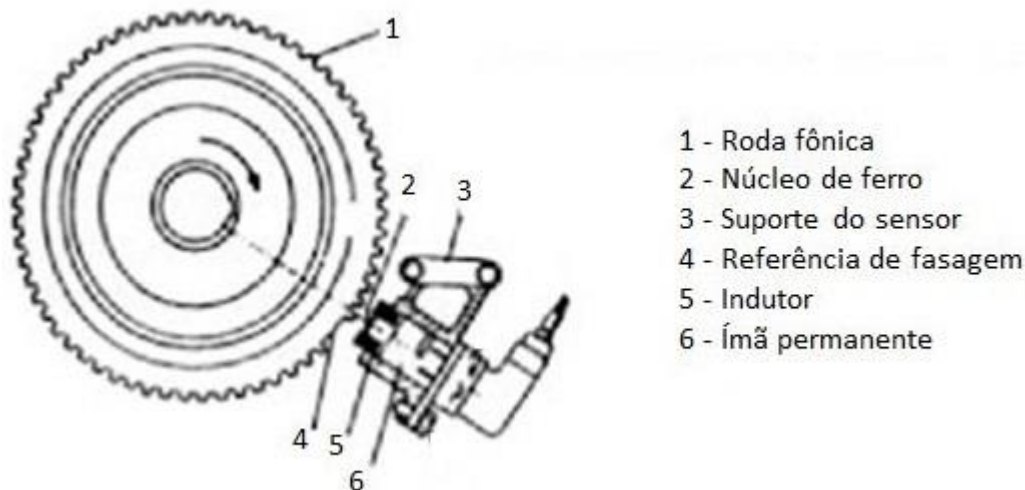
Para medir o torque em uma dada rotação é necessário impor ao eixo um momento externo resistente de mesmo valor que o produzido pelo motor. Caso contrário, a rotação irá variar, aumentando ou diminuindo à medida que o momento torçor resistente aplicado torna-se menor ou maior que o produzido pelo motor.

Esse efeito pode ser obtido com o uso de um freio popularmente denominado freio dinamômetro ou simplesmente dinamômetro.

2.1.3 Rotação

Em veículos automotivos comerciais o conjunto que monitora a rotação é constituído basicamente por uma roda dentada (ou fônica), ímã permanente, núcleo ferromagnético, bobina, fios da bobina, malha de blindagem e conector do sensor (Figura 5) (DS, 2016).

Figura 5. Conjunto para monitorar rotação em veículo comercial.



Fonte: adaptado de Ferro (2016).

Roda fônica é um disco de material ferromagnético que rotaciona solidário ao eixo árvore do motor. Possui dentes em seu diâmetro externo, os quais são os responsáveis por ativar nível lógico alto na saída do sensor de rotação, gerando um sinal pulsado, o qual é enviado à unidade de comando eletrônico (UEC).

As rodas fônicas utilizadas em veículos comerciais possuem padrões para o número de dentes, alguns exemplos mais comuns utilizados são 60-2 (sessenta menos dois), 60-1, 48-2, 36-2, 36-1, 30-2 e 30-1.

O número de dentes da roda fônica em veículos comerciais é importante para a precisão na determinação da posição do pistão, dado que quanto maior a quantidade de divisões (dentes) maior é a certeza da posição onde o pistão se encontra para cada pulso gerado.

Nesse trabalho a roda fônica utilizada será a peça original do motor Honda, a qual possui aletas de ventilação, e são essas aletas que serão contadas para determinação da rotação (Figura 6).

Figura 6. Roda aletada do motor GX-35 utilizada para determinação da rotação.



Fonte: Adaptado de Wsepo (2016).

A roda de ventilação do motor Honda GX-35 possui originalmente 22 aletas, entretanto para o desenvolvimento do trabalho foi utilizada uma roda que possui apenas 21 aletas, ou seja, serão gerados 21 pulsos por rotação do eixo do motor.

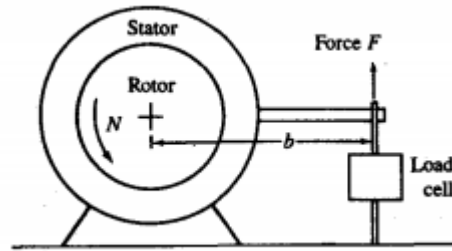
2.2 DINAMÔMETRO

Dinamômetro na indústria automotiva é o equipamento usado para determinar o torque e a potência dos motores usados em veículos. Existem diversas formas de dinamômetros, os quais são divididos em dinamômetro de freio e dinamômetro de inércia (MARTINS, 2013).

O freio de Prony, desenvolvido em 1821 pelo engenheiro francês Gaspard Prony, é o elemento didático utilizado para que se compreenda o funcionamento dos dinamômetros. Apesar de ilustrar claramente o princípio de funcionamento de todos os dinamômetros, na prática, só pode ser utilizado para pequenas potências. No entanto, é uma ilustração muito clara do princípio de funcionamento de todos os dinamômetros.

O freio dinamômetro é um equipamento que tende a frear o eixo do motor por atrito mecânico, eletromagnetismo ou princípios hidráulicos. O estator do sistema é acoplado a um braço de comprimento “b”, o qual está acoplado a uma célula de carga para que seja medida a força exercida pelo motor na extremidade do braço (Figura 7) (HEYWOOD, 1988).

Figura 7. Princípio do freio dinamômetro



Fonte: Heywood (1988).

Calcula-se o torque gerado pelo motor e entregue ao dinamômetro através da Equação 1:

$$T = F.b \quad (1)$$

Sendo:

- T = torque exercido pelo motor (Nm);
- F = força medida pela célula de carga (N);
- b = comprimento do braço (m).

Para determinar a potência que o motor entrega ao dinamômetro utilizamos a Equação 2:

$$P = \frac{2.\pi.N.T}{60000} \quad (2)$$

Onde:

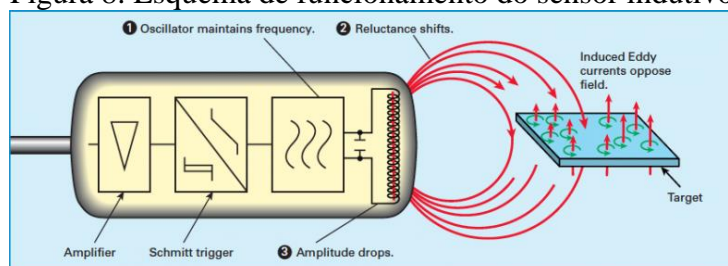
- P = potência do motor (kW);
- N = rotação do motor (rpm);
- T = torque (Nm).

2.3 SENSOR DE ROTAÇÃO

Existem diversas maneiras de mensurar a frequência com que um eixo rotaciona e o dispositivo utilizado para isso é chamado tacômetro. Para esse trabalho, foi utilizado um sensor indutivo, o qual envia um sinal pulsado proporcional à frequência de rotação ao microcontrolador, tendo assim o dado de rotação do motor.

O sensor indutivo é composto por um núcleo de ferrite envolto por uma bobina, um circuito oscilador e, por fim, um circuito disparador em conjunto com um amplificador (Disparador de Schmitt) (Figura 8).

Figura 8. Esquema de funcionamento do sensor indutivo.



Fonte: Adaptado de Silveira e Lopes (2016).

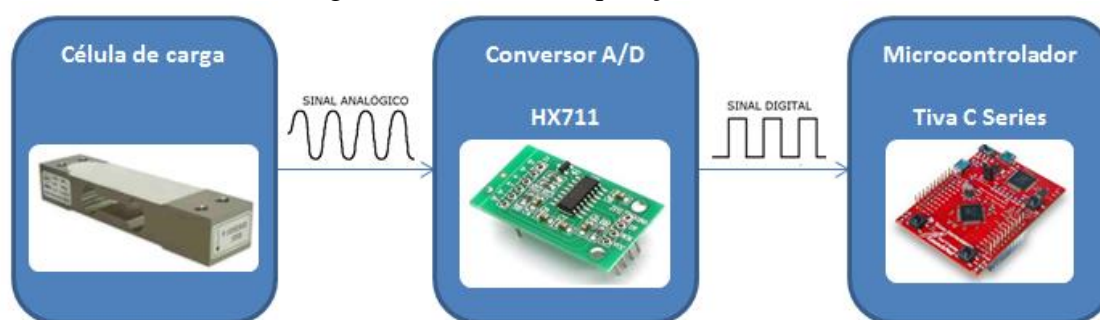
O princípio de funcionamento se dá a partir de um campo eletromagnético variável que é gerado pelo oscilador em conjunto com a bobina na extremidade do dispositivo. Quando um material metálico penetra este campo, são induzidas pequenas correntes parasitas. Com a indução no metal, ocorre uma diminuição na energia do campo e, conseqüentemente na amplitude do sinal proveniente do oscilador. Quando este sinal se torna muito baixo, o circuito de disparo percebe a mudança e altera a tensão de saída. Fornecendo uma resposta lógica, de nível alto ou baixo, que pode ser utilizada no controle do processo (SILVEIRA; LOPES, 2016).

O sensor indutivo possui algumas características que tornam seu uso uma opção muito viável e vantajosa na aplicação em sistemas industriais. Por não possuírem partes móveis, o sensor indutivo possui uma vida útil prolongada em relação aos sensores fim de curso que utilizam contatos mecânicos. Adicionalmente, são componentes muito bem vedados e que podem trabalhar em ambientes com poeira (não metálica) e até mesmo em contato com líquidos. E apesar da pequena distância de detecção, apresenta ótima precisão e, portanto, repetibilidade em medições de proximidade. (SILVEIRA; LOPES, 2016).

2.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA

O sistema de aquisição de força é composto por uma célula de carga, um conversor analógico-digital (A/D) e uma plataforma de prototipagem com microcontrolador para processamento dos dados (Figura 9).

Figura 9. Sistema de aquisição de dados.



Fonte: O autor (2016).

2.4.1 Célula de carga

Célula de carga é um dispositivo eletromecânico cuja propriedade é a medição das deformações de um corpo convertendo-a em tensão, sendo possível medir cargas estáticas ou dinâmicas de tração ou compressão.

A conversão de força para tensão é dada via extensômetros, os quais são colados ao corpo da célula de carga e inteiramente solidários à sua deformação. Uma força é aplicada ao corpo da célula de carga provocando uma deformação e essa por sua vez é transmitida aos extensômetros, que medirão sua intensidade (CONCEIÇÃO, 2005).

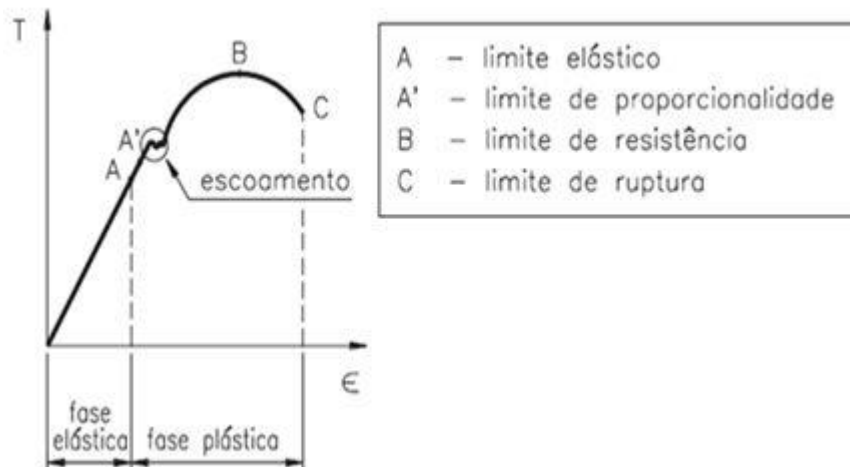
Pela ação de forças externas, qualquer corpo sólido se deforma, mesmo que de maneira mínima, então ao submeter uma peça metálica a determinado esforço, esta será deformada e sua deformação é proporcional ao esforço aplicado. Para deformações elásticas se cumpre a Lei de Hooke dada pela Equação 3, na qual a constante de proporcionalidade E (MPa), é conhecida por módulo de elasticidade ou módulo de Young (BEVITORI, 2010).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

A lei de Hooke estabelece a relação entre a tensão e a deformação do material submetido a certo esforço mecânico no regime de deformação elástico. Para determinar esta relação utilizamos o ensaio de tração, que consiste em submeter um corpo de prova a tensões até a sua ruptura (HIBBELER, 2010).

A partir do ensaio de tração é possível determinar a curva de tensão por deformação do material (Figura 10).

Figura 10. Curva característica do gráfico de tensão por deformação de materiais dúcteis



Fonte: Trigo (2016).

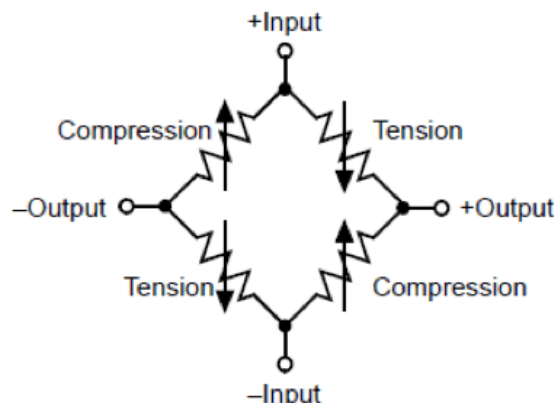
As deformações elásticas não são permanentes, pois quando a carga é removida o corpo retorna ao seu formato ou dimensão original (BEVITORI, 2010).

Dado o que foi apresentado, sabemos que as células de carga são projetadas para trabalharem dentro do regime de deformação elástica, uma vez que a cada medição realizada buscamos partir de uma deformação nula até uma deformação que não faça com que o material da célula de carga escoe permanentemente.

O extensômetro elétrico ou strain-gage é um resistor elétrico composto de uma finíssima camada de material condutor, depositado sobre um composto isolante. Este é então colado sobre a estrutura em teste, no caso, a célula de carga (BECK; SILVA; HAUDE, 2005).

A célula de carga é um transdutor que utiliza um circuito chamado ponte de Wheatstone para converter força em um sinal elétrico de tensão. A Figura 11 representa o circuito elétrico de uma ponte completa de Wheatstone.

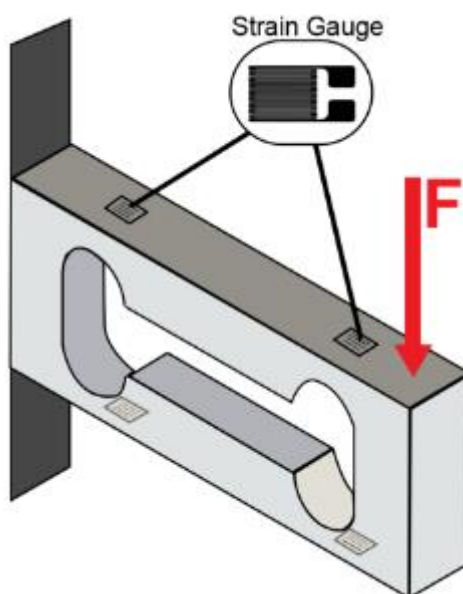
Figura 11. Ponte de Wheatstone utilizado em célula de carga.



Fonte: (GUPTA; SADASIVAM, 2011).

Quando a carga é aplicada ao corpo de uma célula de carga resistiva, o membro elástico deflete e cria uma deformação nos lugares onde os strain gages estão devido à carga aplicada. Como resultado, dois dos strain gages sofrem esforço de compressão enquanto os outros dois sofrem tração (REDDY, 2016, tradução nossa).

Figura 12. Posicionamento dos strain-gages na célula de carga.



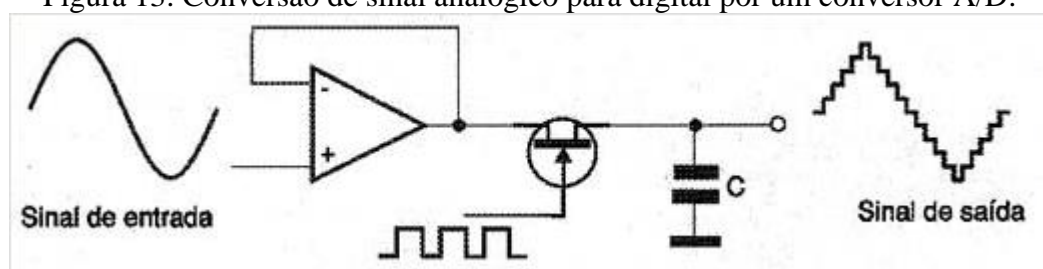
Fonte: Adaptado de Reddy (2016).

2.4.2 Conversor analógico-digital

A célula de carga é um transdutor que converte força mecânica em sinais elétricos. A célula de carga mais comumente usada atualmente é do tipo strain gage, a qual usa um conjunto de strain gages para medir a deformação de um membro da estrutura e converter esses dados em sinais elétricos analógicos. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013).

Para converter um sinal da forma analógica para a forma digital, usamos uma configuração denominada conversor analógico/digital, ADC ou simplesmente conversor A/D. Um conversor A/D transforma um sinal analógico, contínuo no tempo, num sinal amostrado, discreto no tempo, quantizado dentro de um número finito de valores inteiros, determinado pela resolução característica do conversor em bits (Figura 13) (BRAGA, 2014).

Figura 13. Conversão de sinal analógico para digital por um conversor A/D.

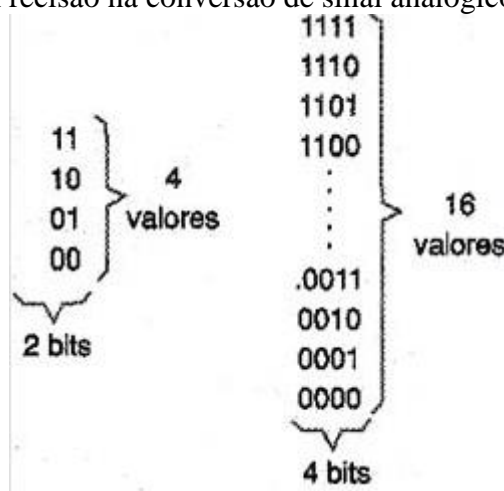


Fonte: (BRAGA, 2014).

Os valores instantâneos da tensão do sinal de entrada, que são obtidos na saída do circuito de amostragem e retenção precisam ser convertidos para a forma digital. Este processo recebe o nome de "quantização". A representação dos valores instantâneos amostrados pelos circuitos depende do nível de quantização realizado, ou seja, quantos bits são usados para representar cada valor amostrado (BRAGA, 2014).

Conforme o exposto, percebemos que a precisão com que um sinal analógico é representado na forma digital depende diretamente da quantidade de bits que o conversor utiliza, dessa forma se usamos dois bits teremos uma precisão menor do que se usarmos quatro bits para fazer a quantização (Figura 14).

Figura 14. Precisão na conversão de sinal analógico para digital.



Fonte: (BRAGA, 2014).

2.4.3 Microcontroladores e plataformas de prototipagem

Plataformas de prototipagem baseadas em microcontroladores são placas eletrônicas que facilitam a aplicação de códigos de programação na prática e podem ser utilizadas em projetos de diversas áreas de conhecimento. Ao permitir a rápida prototipagem, esses kits podem ser utilizados não só como ferramenta para projeto de equipamentos de laboratório,

mas também como as próprias ferramentas de aprendizado (TAVARES; CARSTENS; VEIGA, 2014).

Os microcontroladores são microprocessadores que podem ser programados para funções específicas. Em geral, eles são usados para controlar circuitos e, por isso, são comumente encontrados dentro de outros dispositivos, sendo conhecidos como "controladores embutidos". A estrutura interna de um microcontrolador apresenta um processador, bem como circuitos de memória e periféricos de entrada e saída. (MICROCONTROLADORES, 2016)

Nessas plataformas de projeto, não somente o código fonte do software está aberto e livre para uso e modificações, mas também o hardware é aberto e livre, ou seja, os esquemas eletrônicos, os layouts das placas e as listas de componentes são disponibilizados gratuitamente para uso e modificações.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo são descritos os itens adquiridos que serão utilizados nos testes, os desenhos técnicos das peças construídas para montagem do sistema mecânico do dinamômetro, assim como os componentes eletrônicos utilizados para construir o sistema de aquisição de dados de toque e rotação. Foi ainda criada uma metodologia para realização do ensaio com o motor para que haja padronização e, dessa forma, que seja possível comparar dados entre um teste e outro. Por fim foi descrita a forma de tratativa dos dados obtidos para geração dos gráficos de torque e potência do motor a partir dos dados coletados pelo sistema de aquisição.

3.1 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Para realização dos ensaios foi utilizado um MCI de baixa cilindrada da Honda, modelo GX35, tendo como características os valores fornecidos pelo fabricante (Tabela 1):

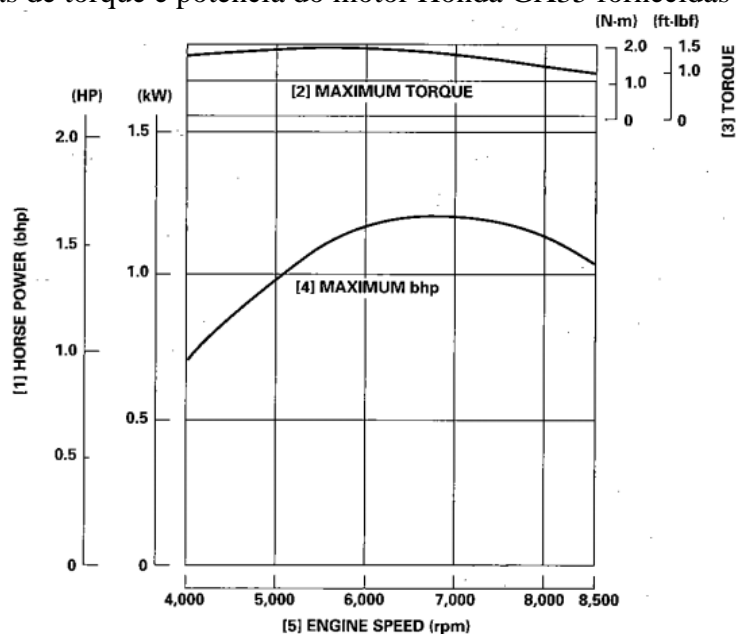
Tabela 1 – Características do motor Honda GX35.

<i>Tipo do motor</i>	4 tempos, resfriado à ar, OHC
<i>Razão de compressão</i>	8:1
<i>Cilindrada</i>	35,8 cm ³
<i>Potência Máxima (7000 rpm)</i>	1,2 kW
<i>Torque Máximo (5500 rpm)</i>	1,9 N.m

Fonte: Honda Engines (2014).

Segundo Honda (2014) o motor GX35 é um motor de quatro tempos que utiliza como óleo padrão o SAE 10W30, trabalhando com rotação entre 1000 a 8000 rpm e com sistema de válvulas OHC (Over Head Camshaft), segundo Heywood (1988) é um sistema de comando de válvula localizado sobre a cabeça do cilindro (cabeçote), apresentando apenas um eixo de cames controlando a abertura e fechamento de válvulas. As curvas de torque e potência do motor GX35 são apresentadas na Figura 15:

Figura 15. Curvas de torque e potência do motor Honda GX35 fornecidas pelo fabricante.



Fonte: Honda Engines (2014).

3.2 SENSOR DE ROTAÇÃO

O sensor de rotação utilizado é modelo BES 516-325-G-S4-C produzido pela Balluff e possui as características descritas na Tabela 2:

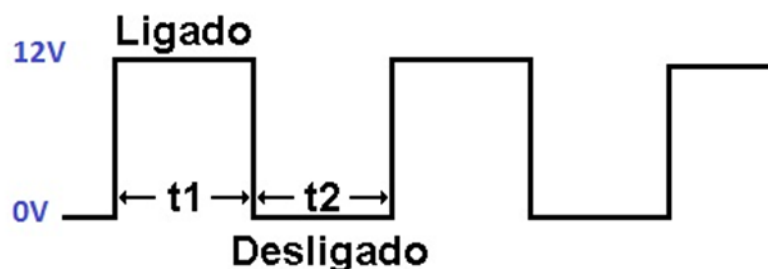
Tabela 2. Especificações do sensor indutivo utilizado.

<i>Sensor Indutivo BES 516-325-G-S4-C</i>	
<i>Conexão</i>	<i>Cabo</i>
<i>Diâmetro</i>	<i>12 mm</i>
<i>Distância de detecção</i>	<i>4 mm</i>
<i>Sinal de saída</i>	<i>PNP</i>
<i>Lógica</i>	<i>NO</i>
<i>Tensão de alimentação</i>	<i>10~30 Vcc</i>
<i>Frequência máxima</i>	<i>1000 Hz</i>

Fonte: (BALLUFF, 2012).

Esse sensor será alimentado por uma fonte de 12V, dessa forma o sinal de saída obtido é idealmente representado na Figura 16 caso todos os dentes da roda fônica fossem lidos e também que estivessem igualmente espaçados entre si, criando um sinal regular com pulsos de mesma frequência e intensidade.

Figura 16. Sinal onda quadrada ideal.

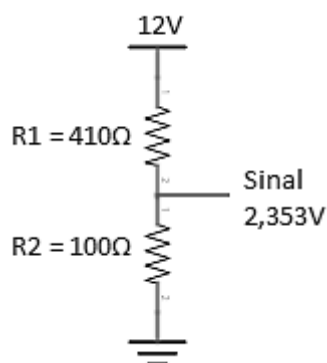


Fonte: Adaptado de Robocore (2016).

Esse sinal é conhecido como TTL (*transistor-transistor logic*) e é caracterizado pela condição de nível lógico (0 e 1 – 0V e 12V), na qual teremos 12V no fio de sinal do sensor quando este estiver polarizado, ou seja, quando houver um material metálico em seu campo de leitura, e 0V caso contrário.

Para que seja feita a leitura desse sinal pelo microcontrolador é preciso tomar o cuidado de aplicá-lo no nível correto da porta do microcontrolador, uma vez que os 12V provenientes do sensor danificariam o microcontrolador. Para isso utilizou-se um circuito divisor de tensão composto por dois resistores, um de 410Ω e outro de 100Ω , os quais condicionam o sinal do sensor, baixando para 2,353V, como apresentado na Figura 17:

Figura 17. Circuito divisor de tensão.



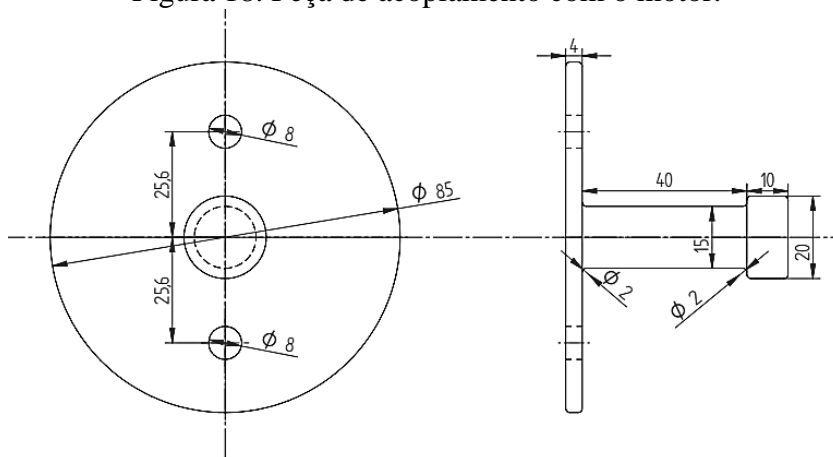
Fonte: O autor (2016).

3.3 PROJETO MECÂNICO DO DINAMÔMETRO

Devido à simplicidade e vantagens do sistema, o dinamômetro que foi desenvolvido se baseia no princípio de atrito mecânico, no qual um mecanismo tende a frear a rotação do motor, transmitindo torque por um braço, que será medido utilizando uma célula de carga.

Foram projetadas e construídas peças para construção desse sistema de dinamômetro, as quais são descritas a seguir:

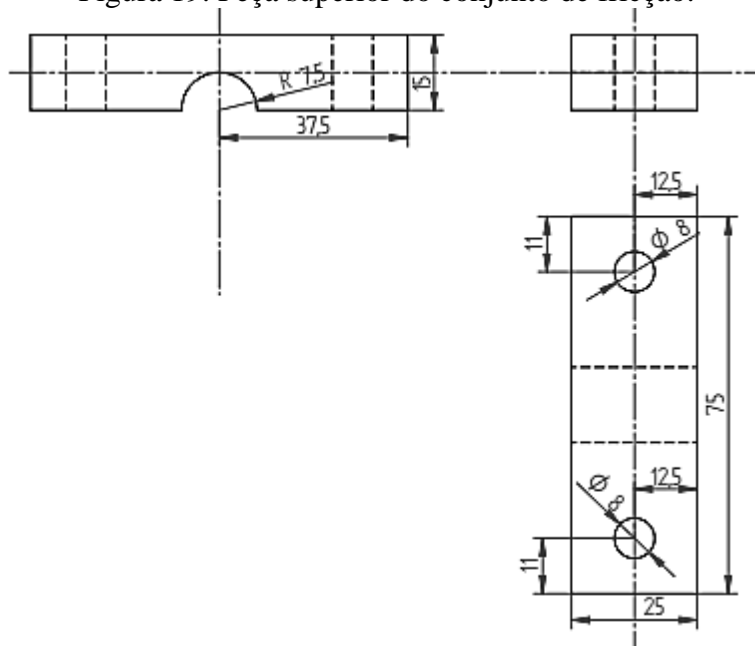
Figura 18. Peça de acoplamento com o motor.



Fonte: O autor (2016).

A peça da Figura 18 é o acoplamento rotativo (rotor) entre o sistema de fricção e o motor de combustão e foi construída via processos de usinagem em aço 1020.

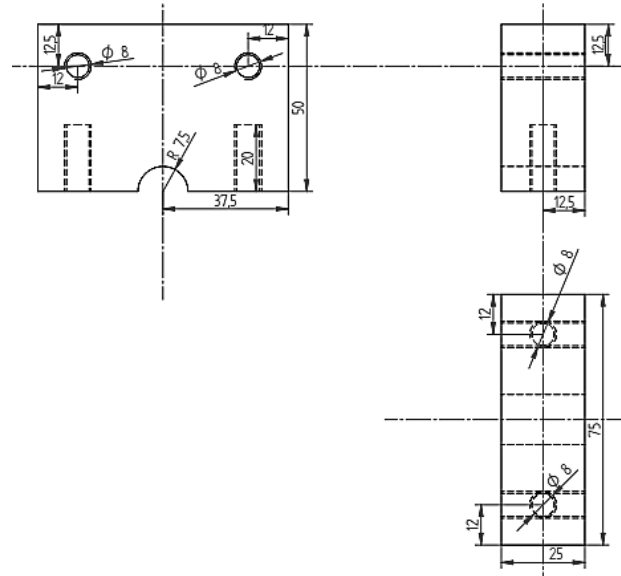
Figura 19. Peça superior do conjunto de fricção.



Fonte: O autor (2016).

A peça da Figura 19 foi construída em aço 1020 e é um dos elementos que compõe a parte estática (estator) do conjunto que sofre fricção com a peça rotativa da Figura 18.

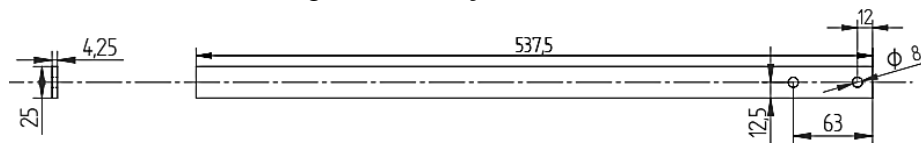
Figura 20. Peça inferior do conjunto de fricção.



Fonte: O autor (2016).

A peça da figura 20 foi construída também em aço 1020 e complementa o conjunto estator de fricção formando um mordente sobre a peça rotativa, mecanismo esse que será responsável pela transmissão do torque do motor até a célula de carga.

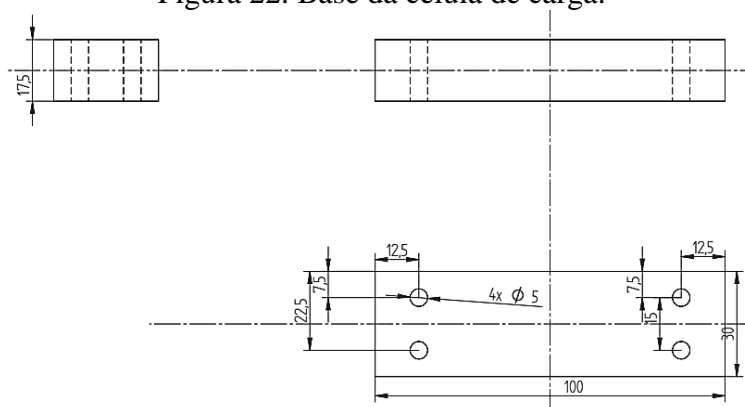
Figura 21. Braço de alavanca.



Fonte: O autor (2016).

O braço de alavanca da Figura 21 é construído em aço 1020 e é o elemento que transmite o torque do motor até a célula de carga.

Figura 22. Base da célula de carga.

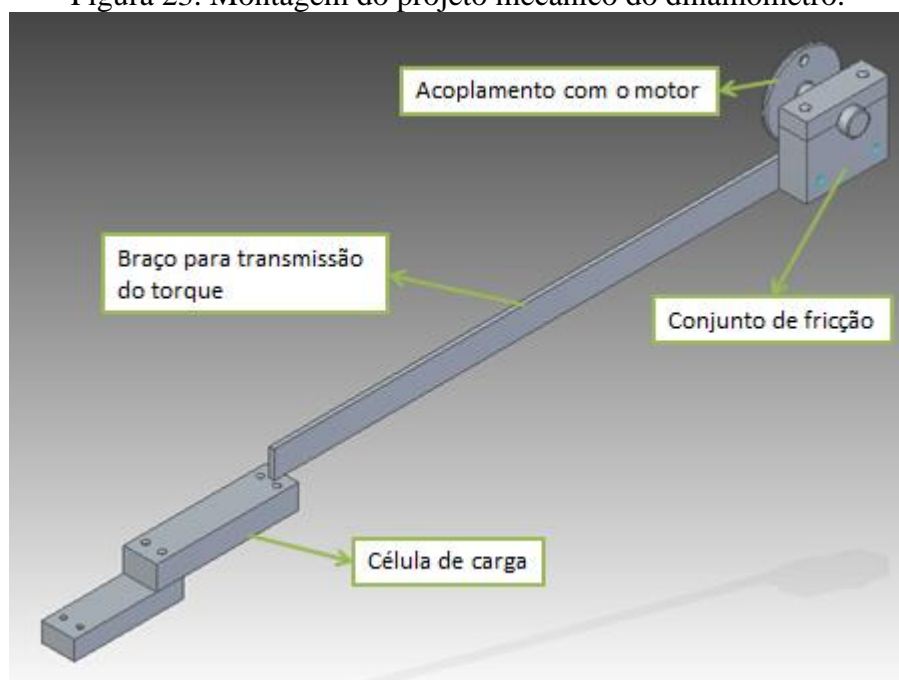


Fonte: O autor (2016).

A Figura 22 demonstra a peça que atua como base para a célula de carga, a qual foi construída em alumínio.

O conjunto completo projetado é mostrado em sua totalidade na Figura 23.

Figura 23. Montagem do projeto mecânico do dinamômetro.

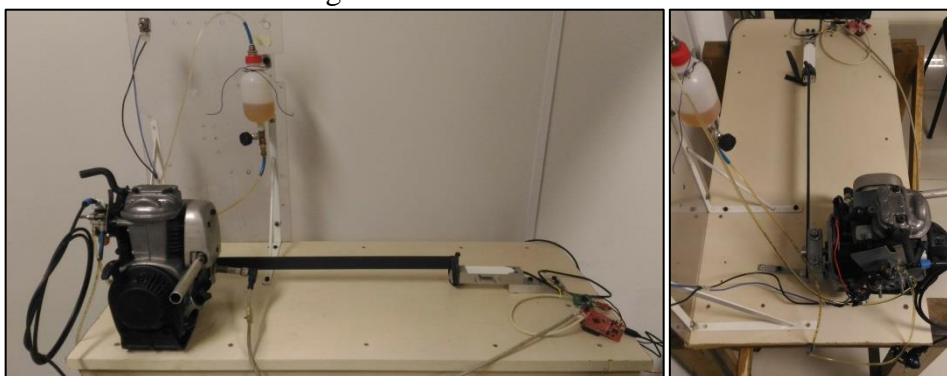


Fonte: O autor (2016).

Todas as peças descritas anteriormente, assim como a montagem em CAD do sistema foram feitas utilizando o software Solid Edge® Student Edition.

Finalmente a figura 24 demonstra o conjunto das peças projetadas, as quais foram construídas e montadas em bancada.

Figura 24. Bancada de testes



Fonte: O autor (2016).

3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA E ROTAÇÃO

O sistema físico de aquisição de força e rotação é composto pela plataforma Tiva™ C Series Launchpad da Texas Instruments, um conversor A/D HX711, uma célula de carga da International Weighing Manufacture (IWM) e um sensor de indutivo Balluff. Todos esses componentes serão descritos detalhadamente a seguir. É ainda apresentada a metodologia de aquisição dos dados pelo controlador e o tratamento desses dados, gerando os gráficos utilizando o LabView.

3.5 TIVA™ C SERIES LAUNCHPAD

Para implementação da célula de carga, leitura do conversor A/D HX711 e aferição do dado de rotação do motor foi utilizada a Tiva™ C Series Launchpad, que consiste em uma plataforma de avaliação de baixo custo da Texas Instruments para microcontroladores da linha ARM Cortex-M4F. A placa contém o microcontrolador TM4C123GH6PM, um Cortex-M4 com suporte a ponto flutuante e que roda a 80MHz, com 256KB de memória flash, 32KB de memória RAM, e possui diversas interfaces de comunicação e controle como UART, SSI, I2C, CAN, USB e ADC (PRADO, 2012).

3.6 CONVERSOR A/D

O conversor utilizado foi o HX711, o qual consiste em um amplificador e um conversor com precisão de 24 bits desenhado para balanças industriais e aplicações de controle para ser ligado diretamente a uma célula de carga (NOGUEIRA, 2015).

A tabela 3 apresenta as especificações técnicas do módulo conversor A/D HX711 utilizado:

Tabela 3. Especificações técnicas do módulo conversor A/D HX711.

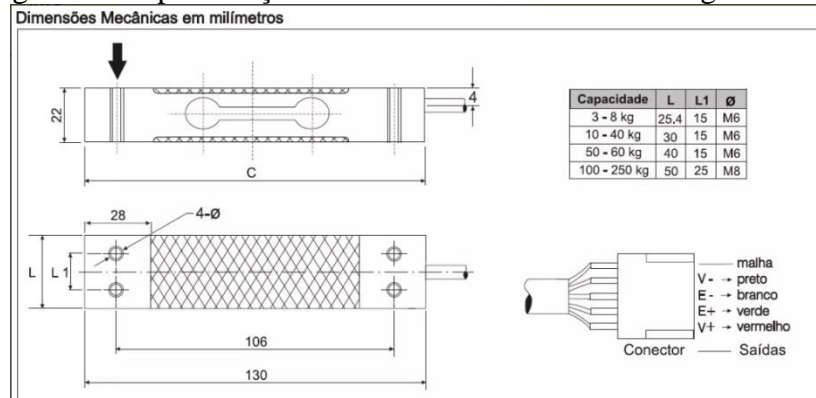
<i>Tensão de alimentação</i>	<i>2.7 a 5V</i>
<i>Diferencial de tensão de entrada</i>	<i>$\pm 40mV$</i>
<i>Precisão dos dados</i>	<i>24 bits</i>
<i>Frequência de atualização</i>	<i>80 Hz</i>
<i>Corrente de funcionamento</i>	<i>< 10 mA</i>
<i>Tamanho</i>	<i>38mm x 21mm X 10mm</i>
<i>Ganho selecionável</i>	<i>32, 64 e 128 vezes</i>
<i>Temperatura de operação</i>	<i>-40 até +85 °C</i>

Fonte: Adaptado de Nogueira (2015).

3.7 CÉLULA DE CARGA

A célula de carga utilizada para realização do trabalho foi produzida pela International Weighing Manufacture (IWM) e possui capacidade de 10kg. As especificações dimensionais estão descritas na Figura 25 e as especificações técnicas estão na Figura 26:

Figura 25. Especificações dimensionais da célula de carga utilizada.



Fonte: (IWM, 2016).

Figura 26. Especificações técnicas da célula de carga utilizada.

Sensibilidade	mV/V	2.0 ± 10%
Não linearidade	%F.S.	<0,017
Histerese	%F.S.	<0,017
Repetibilidade	%F.S.	<0,017
Efeito acomodação(30 min)	%F.S.	<0,017
Balanço de zero	%F.S.	± 2
Efeito da temp. na sensibilidade	%F.S./10°C	<0,015
Efeito na temp. no zero	%F.S./10°C	<0,015
Impedância de entrada	Ω	410 ± 30
Impedância de saída	Ω	350 ± 3
Resistência de isolamento	MΩ	>2000 / 50VDC
Tensão recomendada	V	6 ~10
Máxima tensão	V	15
Faixa de temp. homologada	°C	-10 ~+ 40
Faixa de temp. operação	°C	-10 ~+ 60
Deflexão nominal aproximada	mm	0,5
Sobrecarga segura	%F.S.	150
Sobrecarga máxima	%F.S.	300
Tamanho da plataforma	mm	350 x 350
Tamanho do cabo	mm	ø 4 x 450⇒60 kg / 3000⇒250 kg
Torque nominal	Nm	6.8 ⇒ 60 kg / 16.3 ⇒ 250 kg
Material do corpo	Alumínio anodizado	
Peso aproximado	kg	0,2 ⇒ 60 kg / 0,3 ⇒ 250 kg
Tipo do cabo	redondo de PVC com malha interna contra EMI, Fios #AWG 22	

Fonte: (IWM, 2016).

3.8 AQUISIÇÃO DE ROTAÇÃO

Para mensurar a rotação através das leituras do sensor indutivo é usada a melhor estratégia encontrada por Korol (2015), na qual se faz a contagem do tempo transcorrido a cada leitura de um número fixo de pulsos.

Essa estratégia de contagem dispara um cronômetro na leitura do primeiro pulso, transcorre o tempo para que certo número de pulsos ocorra e no último pulso o dado de tempo é obtido, dessa forma calculamos a frequência de pulsos pela Equação 4:

$$f = \frac{n}{\Delta t} \quad (4)$$

Onde:

- f = frequência de rotação;
- n = número de pulsos;
- Δt = intervalo de tempo entre o primeiro e o último pulso.

Para que seja obtida a rotação se faz necessário apenas que seja relacionado o número de pulsos lidos com o número de pulsos recebidos em cada rotação do motor.

Para realização dos testes foi ajustada a contagem de cinco voltas pelo microcontrolador até que seja mensurado o tempo. O número de pulsos que se deseja contar é ajustável e devem representar cinco voltas completas do motor.

O dado de tempo é obtido pela contagem do número de clocks do controlador até que sejam contadas as cinco voltas. O tratamento do dado é feito pela conversão do número de clocks recebido para número de rotações do motor em um minuto (rpm).

O clock do microcontrolador foi ajustado em 50MHz, ou seja, são contados 50 milhões de clocks em um segundo e inicialmente buscou-se fazer a leitura de cada aleta da roda do motor, o que representaria 21 pulsos por volta e dessa forma o dado de rotação em rpm é calculado pela Equação 5:

$$Rotação [rpm] = \left(\frac{número\ de\ clocks}{105} \times \frac{1\ segundo}{50 \times 10^6\ clocks} \times \frac{21\ pulsos\ por\ rotação}{1\ rotação} \times \frac{1\ minuto}{60\ segundo} \right)^{-1}$$

$$Rotação [rpm] = \frac{15 \times 10^9}{número\ de\ clocks} \quad (5)$$

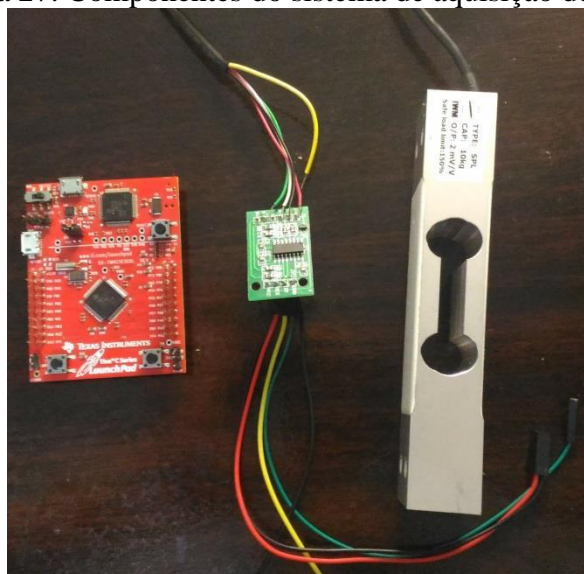
Porém depois de realizados os primeiros testes foi verificado que o sensor de rotação estava fazendo a leitura de apenas um pulso por volta, para isso foi ajustada a equação para contagem dos pulsos, tendo o dado de tempo a cada três rotação do motor. Dessa forma a contagem da rotação ocorre segundo a Equação 6:

$$Rotação [rpm] = \frac{9 \times 10^9}{número\ de\ clocks} \quad (6)$$

3.9 AQUISIÇÃO DE FORÇA

O sistema de aquisição de força é composto pela célula de carga, o conversor A/D HX711 e a plataforma Tiva™ C Series Launchpad. A alimentação do conversor é feita através da Launchpad, a qual é transmitida até a célula de carga. Os componentes são mostrados na Figura 27.

Figura 27. Componentes do sistema de aquisição de força.



Fonte: O autor (2016).

Como apresentado no Capítulo 2, a célula de carga gera um sinal analógico contínuo, o qual através da quantização é convertido em um sinal digital, processo esse que é realizado pelo conversor A/D HX711.

Para transmissão do sinal gerado pelo conversor até a Launchpad é usada uma interface SSI (Synchronous Serial Interface), a qual consiste em uma interface serial amplamente utilizada em aplicações industriais. É uma conexão ponto-a-ponto de um dispositivo master (ex. PLC, microcontrolador ou outro sistema de controle) para um escravo (ex. encoder). Nesse tipo de interface, o dado é atualizado continuamente pelo sensor e se faz disponível para o registrador de saída (POSITAL FRABA, 2013).

Os dados são transmitidos quando o conversor recebe um trem de pulsos do microcontrolador. Quando o bit menos significativo (LSB) é transmitido, um novo dado de força é atualizado no registrador de saída (POSITAL FRABA, 2013).

O dado de 24bit de saída do conversor é em formato de complemento de dois. Quando o sinal de entrada diferencial excede a faixa de 24bit, o dado de saída é saturado em 800000h (min) ou 7FFFFFFh (max), até que o sinal de entrada volte a faixa nominal (AVIA SEMICONDUCTOR, 2016).

Os pinos PD_SCK e DOUT são usados para aquisição de dado, seleção de entrada, seleção de ganho e controle de desligamento (AVIA SEMICONDUCTOR, 2016).

Quando o dado não está pronto para aquisição, o pino digital DOUT está em nível lógico alto. A entrada de clock Serial PD_SCK deve ser de nível lógico baixo. Quando DOUT vai para nível lógico baixo, isso indica que o dado está pronto para aquisição. Aplicando

25~27 pulsos de clock positivos no pino PD_SCK, o dado é transferido para o pino de saída DOUT. Cada pulso em PD_SCK transfere um bit, começando com o primeiro bit mais significativo (MSB), até que todos os 24 bits sejam transmitidos. O 25º pulso na entrada de PD_SCK vai colocar DOUT em nível lógico alto novamente (AVIA SEMICONDUCTOR, 2016).

A entrada e a seleção de ganho são controladas pelo número de pulsos na entrada de PD_SCK. Os pulsos de clock em PD_SCK não devem ser menos de 25 ou mais de 27 em um período de conversão, para evitar causar erro de comunicação serial (AVIA SEMICONDUCTOR, 2016).

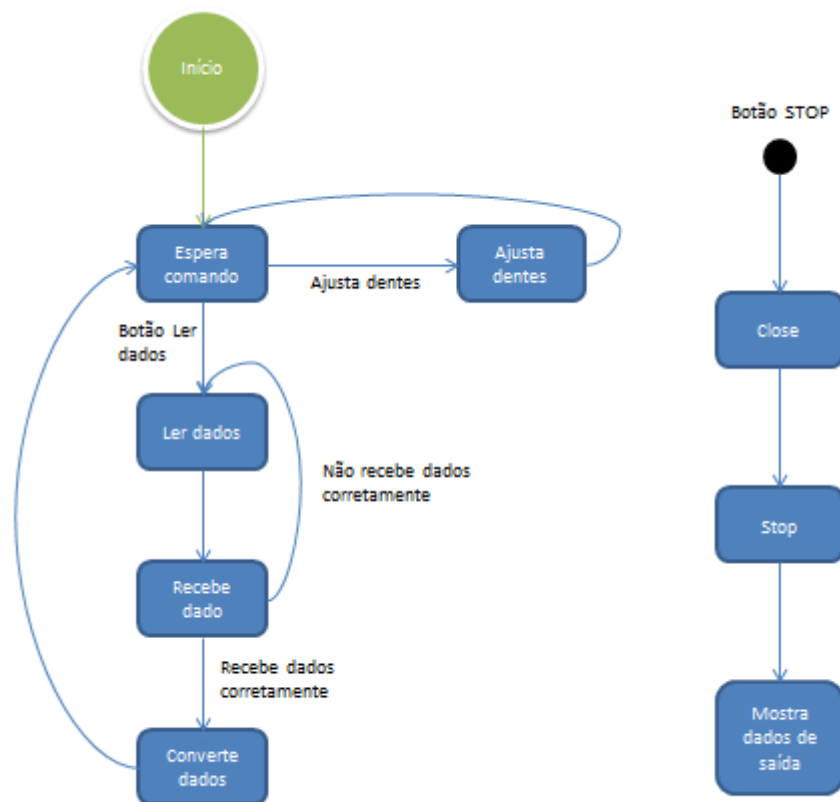
A comunicação entre o computador e a Launchpad é feita através de um microchip UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), o qual segundo Conway e Dehaan (2011) é o microchip com programação que controla a interface serial entre o computador e o dispositivo conectado a ele. Especificamente, proporciona a interface do computador equipado com um terminal de dado (DTE) RS-232C, e esse pode então “falar” com ou trocar dados com dispositivos seriais.

3.10 INTERFACE LABVIEW

Para tratamento dos dados foi desenvolvida uma interface utilizando o software LabVIEW®, o qual consiste em um ambiente de desenvolvimento integrado baseado na linguagem de programação gráfica G, que utiliza um modelo de fluxo de dados em vez de uma sequência de linhas de texto. Dessa forma, é possível escrever códigos funcionais usando um layout visual, mais intuitivo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

A programação no LabView consiste em ações e estados que o microcontrolador faz para realizar a aquisição, para modelamento e construção do programa foi desenvolvido um diagrama de máquina de estados descrito na Figura 28.

Figura 28. Máquina de estados da programação em LabView.



Fonte: O autor (2016).

As ações que ocorrem em cada estado são descritas na Tabela 4:

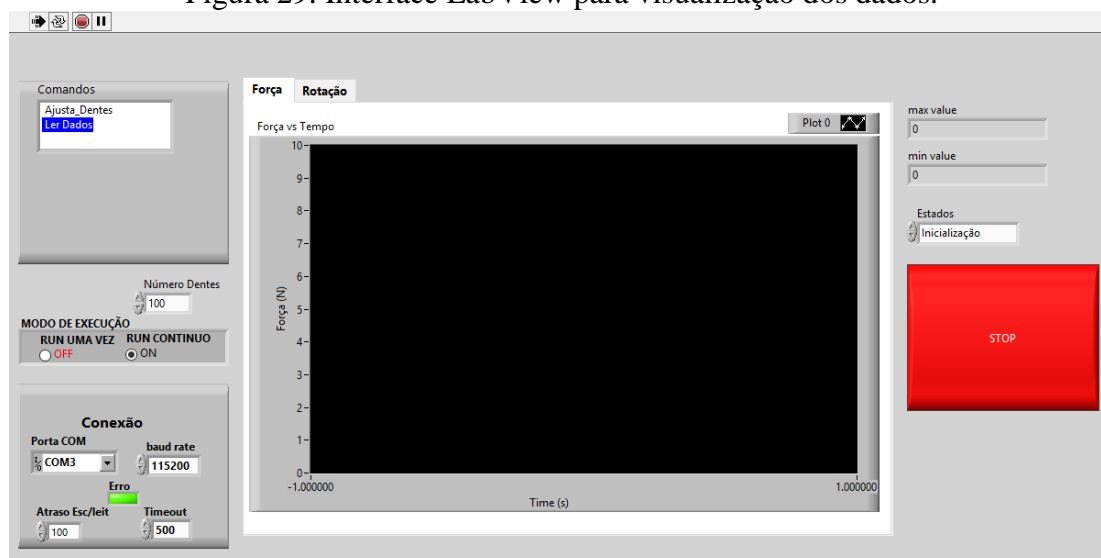
Tabela 4. Descrição das ações da máquina de estados do programa LabView.

Estado	Ação
Início	Inicialização de variáveis Ajuste de parâmetros para comunicação.
Espera comando	Aguarda comando do usuário.
Ajusta dentes	Envia para o microcontrolador o número de dentes ajustados.
Ler dados	Faz requerimento de dados do microcontrolador e grava os dados em arquivo a cada minuto, caso seja verificado que os dados não foram recebidos corretamente retorna para o estado de leitura de dados.
Converte dados	Os dados de rotação e de força são recebidos em binário e convertidos para rotações por minuto (RPM) e Newton (N), respectivamente, para que sejam mostrados ao usuário.
Close	Libera a porta USB usada pelo microcontrolador
Stop	Finaliza o laço de leitura de dados
Mostra dados de saída	Atualiza os dados de força máxima e mínima do ensaio na tela do programa.

Fonte: O autor (2016).

A interface do programa LabView possui opções para selecionar o comando que será executado, caso seja selecionado o comando “Ajusta Dentes” é possível fazer a seleção do número de dentes que serão contados até que seja enviado o dado de tempo. Estando selecionado o comando “Ler Dados” o programa está pronto para fazer a leitura dos dados quando iniciado o teste pelo botão de *Start-Stop*. Existe a possibilidade de escolher entre o modo de operação contínuo ou então realizar apenas um teste. Possui ainda um menu para seleção da conexão com a plataforma Tiva, mostradores dos dados de máxima e mínima força registradas no teste e o visualizador gráfico dos dados de força e de rotação no tempo, o qual ocorre em tempo real com a realização do teste (Figura 29).

Figura 29. Interface LabView para visualização dos dados.



Fonte: O autor (2016).

3.11 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

Foi utilizado o protocolo Rx/Tx para fazer a comunicação entre o computador e o microcontrolador com objetivo de aumentar a confiabilidade dos dados e garantir a correta comunicação entre os dispositivos.

O programa LabView faz a montagem do *frame*, o qual é transmitido. Esse *frame* possui as características descritas na Tabela 5:

Tabela 5. Descrição do frame de comunicação entre o LabView o microcontrolador.

Nome	Função
STX	Esse primeiro comando tem tamanho de 1 byte e valor 0x02, o qual é enviado como comando para que seja iniciada a transmissão de dados.
Comandos + Número de argumentos	Esse comando possui 1 byte e dentro desse byte são utilizados 3 bits para o envio de dados de comandos e 5 bits para envio do número de argumentos que serão transmitidos.
Argumentos	Argumentos da transmissão.
CRC	Esse comando é uma soma dos argumentos transmitidos e funciona como um <i>check</i> para verificar se a transmissão foi feita corretamente.
ETX	Bits que indicam o fim da transmissão.

Fonte: O autor (2016).

3.12 ALGORITMO DO MICROCONTROLADOR

O algoritmo executado pelo microcontrolador é dividido em duas etapas, primeiramente a inicialização de variáveis e configurações de operação, então inicia a segunda etapa, na qual o controlador entra em um estado de espera e aguarda pela ocorrência de interrupções, as quais farão a execução das funções de operação.

Na primeira etapa é ajustada a frequência de clock do microcontrolador para 50MHz, são inicializados os periféricos GPIO, UART e SSI para transmissão, recebimento e tratamento de dados.

Na segunda etapa existem três interrupções, a primeira é referente ao recebimento do dado do conversor A/D HX711 a qual ocorre dez vezes por segundo. A segunda é referente ao tratamento de comandos que foram recebidos, utilizando comunicação via UART. Por último temos a interrupção responsável pela contagem dos pulsos do sensor de rotação, no qual um contador é incrementado a cada borda de subida do sinal, depois de contadas 5 rotações do motor, a quantidade de tempo necessária para a contagem é transmitida e o contador é zerado para que uma nova contagem se inicie.

3.13 MÉTODO PARA ENSAIO DE MOTORES

Para realização dos ensaios dos motores foi desenvolvida uma metodologia a fim de padronizar os resultados e conseguir compará-los. Os testes são realizados com as seguintes características:

- Gasolina comum;
- Válvula borboleta completamente aberta;
- Rotação máxima do motor para início;
- Parafusos do conjunto de fricção soltos.

Para que se inicie um teste primeiramente é ligado e verificado o sistema de aquisição de dados, após isso é dada ignição no motor e feita a abertura da válvula borboleta buscando a rotação máxima que o motor consegue desenvolver. A aquisição de dados é então iniciada e depois de alcançada a rotação máxima do motor inicia-se a aplicação do torque nos parafusos do conjunto de fricção que tende a freá-lo.

O processo de frenagem do motor é feito gradativamente até que seja alcançada uma rotação de aproximadamente 3000 rpm. Depois de alcançada essa rotação é desligado o motor e parado o sistema de aquisição de dados. Os dados são gerados e salvos em arquivos de texto, os quais são inseridos em planilhas para que sejam analisados.

Inicialmente são analisadas as curvas de força e rotação pelo tempo, buscando estudar os dados em termos de magnitude e dispersão. A curva de rotação deve iniciar na rotação máxima do motor, em torno de 7000 rpm e decrescer até em torno de 3000 rpm para que seja validado o teste e garantir que sejam adquiridos os dados em toda a faixa esperada de operação do motor.

Os dados de força são recebidos na forma bruta, ou seja, deve ser descontado o valor do peso do sistema sobre a célula de carga no estado inicial, o qual é de aproximadamente 2,8N. Após isso, faz-se o cálculo do valor de torque (T) pela Equação 7 :

$$T = F \cdot d \quad (7)$$

Onde “d” representa o comprimento do braço e tem valor de 0,5m.

Tendo os valores de torque definidos, geram-se os gráficos de torque por rotação e depois de potência por rotação. São então geradas curvas de tendência para os dados de torque e rotação como polinômios de segundo grau e essas curvas representam os resultados obtidos no teste.

A metodologia empregada nos testes não segue nenhuma norma para realização de testes com motores de combustão, por isso não se pode fazer a comparação direta dos resultados com a curva de torque potência fornecida pelo fabricante.

O sistema montado tem como objetivo a aquisição de dados e geração das curvas de torque e potência. As características do motor fornecidas pelo fabricante servem apenas como norte para os dados que foram obtidos, ou seja, a magnitude dos dados não pode ser comparada diretamente, porém os dados fornecidos servem como base para os resultados que são esperados dos testes.

4 RESULTADOS

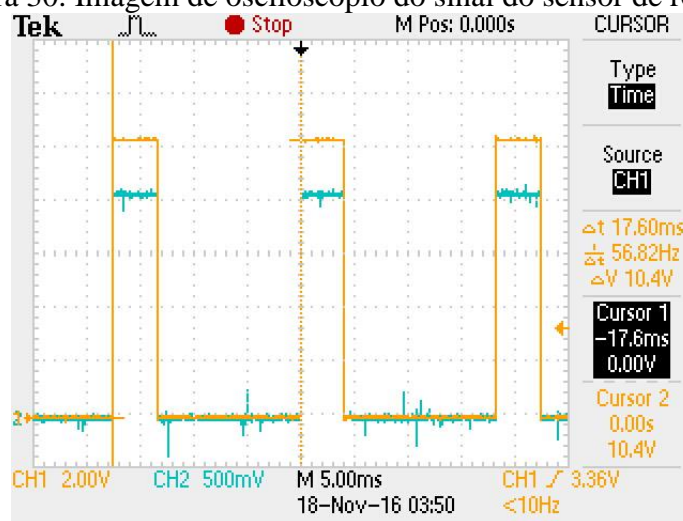
Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente verificou-se o funcionamento do sensor de rotação, depois foi feita a calibração na célula de carga utilizando o sensor de força PS2104 da Pasco e por fim são apresentados os dados obtidos pelos ensaios realizados com os motores depois de aplicadas as tratativas dos dados coletados nos testes.

4.1 VERIFICAÇÃO DO SENSOR DE ROTAÇÃO

O sensor de rotação foi fixado na estrutura do motor e apontado para o centro da roda aletada, depois foi ajustada a distância entre o sensor e as aletas para que fosse capturado um pulso para cada aleta da roda. Esse procedimento foi facilitado pela visualização de um LED no sensor, o qual acende quando o sensor passa a enviar sinal lógico alto por sentir metal em sua extremidade.

Depois de verificado que o sensor estava capturando o sinal de cada aleta quando cada uma era posicionada à frente do mesmo, foi então dada ignição no motor e capturado o sinal recebido do sensor utilizando um osciloscópio (Figura 30).

Figura 30. Imagem de osciloscópio do sinal do sensor de rotação.



Fonte: O autor (2016).

Analizou-se a frequência de ocorrência dos pulsos para verificar se não estava sendo perdida nenhuma leitura de dente e foi constatado um sinal bastante regular, com formato e intensidade esperados. Porém depois de realizado o primeiro teste foi constatado que o sensor estava fazendo apenas uma leitura por rotação.

A leitura feita pelo sensor era apenas de um ímã solidário à roda aletada, o qual é responsável pela faísca de ignição do motor. Dessa forma o sensor fica saturado com o campo magnético desse elemento, desprezando a leitura das aletas em alta rotação, fato esse discutido nas próximas subseções.

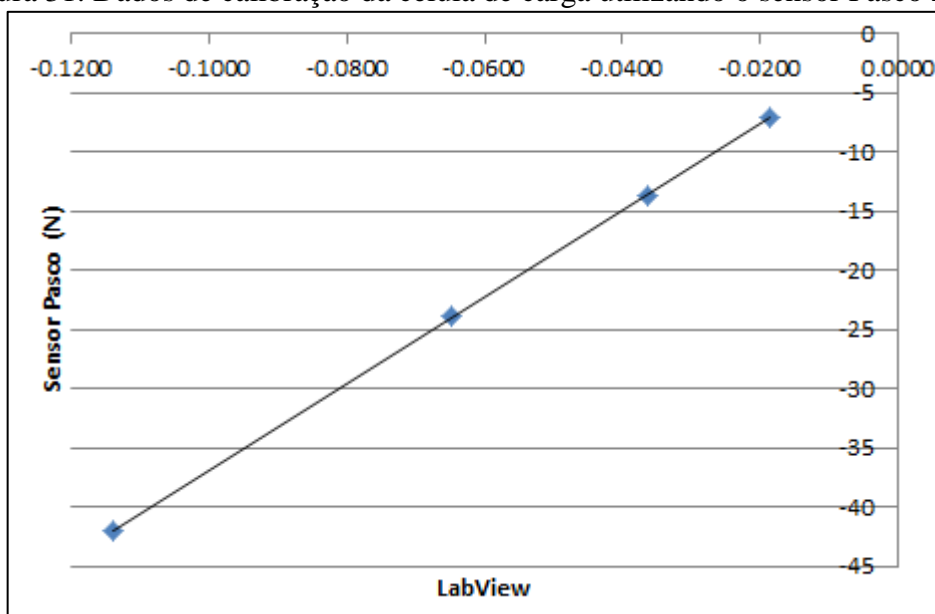
4.2 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Para realizar a calibração da célula de carga foi utilizado um sensor de força Pasco 2104, o qual consiste em um sensor de força que indica a carga aplicada em Newtons (N).

O acoplamento na célula de carga foi realizado através de um fio e foram aplicados níveis de força ao sensor e no LabView eram observados valores entre -1 e +1, sendo -1 o valor para a compressão máxima da célula de carga e +1 o valor para a tração máxima da mesma.

Foram aplicadas cargas compressivas de 7N a 42N e correlacionados os valores de leitura com os valores de carga indicados no sensor (Figura 31).

Figura 31. Dados de calibração da célula de carga utilizando o sensor Pasco 2104.



Fonte: O autor (2016).

Com os dados da calibração é possível perceber que existe uma linearidade entre as medições e, dessa forma, podemos extrapolar os valores de medida através dessa linha, podendo então assumir que valores de leitura intermediários aos valores medidos estarão seguindo a mesma tendência de linearidade.

Finalmente a equação obtida que correlaciona a força e o valor recebido pelo Labview é dada pela Equação 8:

$$F (N) = 365,7 * (\text{Valor leitura}) - 0,299 \quad (8)$$

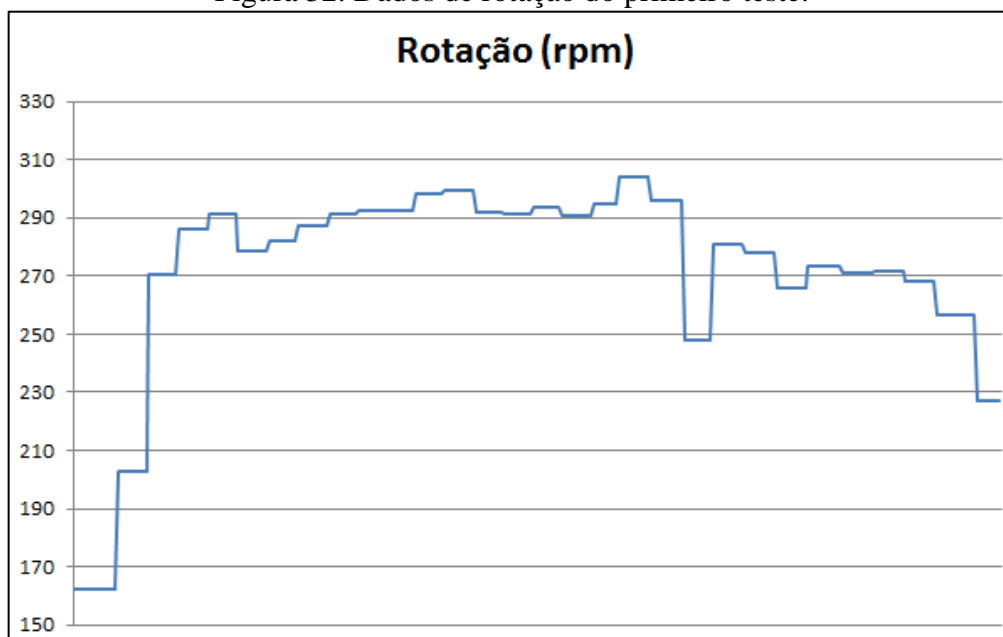
4.3 TESTES COM MOTORES

Os motores foram testados utilizando-se a metodologia descrita e foram feitas as aquisições de dados de força e rotação, os dados foram analisados e correlacionados com objetivo de gerar as curvas de torque e potência do motor.

4.3.1 Primeiro teste

Depois de realizado o primeiro teste foi verificado o valor dos dados de rotação, os quais são apresentados na Figura 32:

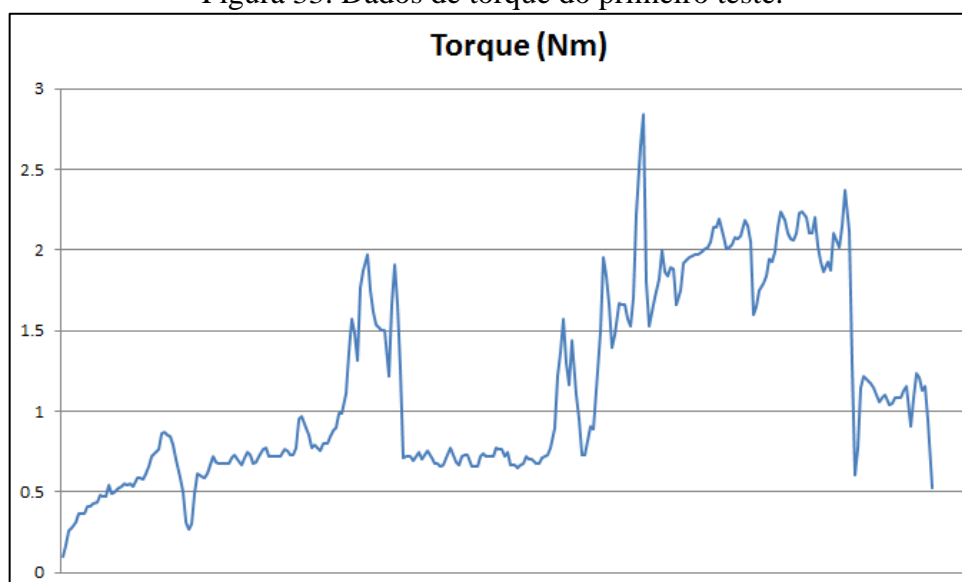
Figura 32. Dados de rotação do primeiro teste.



Fonte: O autor (2016).

Esses dados foram questionados por já se conhecer a faixa de operação do motor em relação à rotação, e esperava-se que a rotação mínima estivesse pelo menos acima de 2000 rpm (rotação de marcha lenta) e alcançando valores próximos aos 7000 rpm. Isso se tornou mais evidente depois de analisados os valores de torque desenvolvidos (Figura 33).

Figura 33. Dados de torque do primeiro teste.



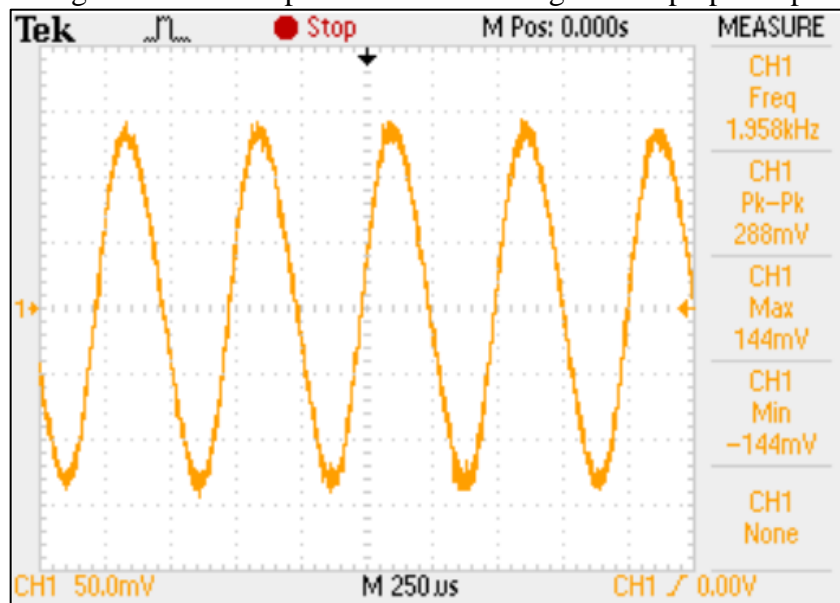
Fonte: O autor (2016).

Esses dados indicaram que o motor estava desempenhando valores de torque em uma faixa esperada, em torno de 2 Nm, o que comparando com a curva de torque fornecida pelo fabricante do motor, verifica-se que o mesmo deveria estar operando em rotações acima de 4000 rpm, dessa forma buscou-se entender o porquê dos valores de rotação obtidos estarem tão abaixo do esperado.

Primeiramente foi verificado o sensor de rotação com um osciloscópio e verificado se não estavam sendo perdidas leituras de dentes, o que faria com que a contagem ocorresse de forma errônea. Nessa verificação não foi possível encontrar o erro, pois o sinal continuava regular como se esperava.

Mesmo sabendo que o sensor de rotação não estava enviando um sinal anormal, optou-se por fazer uma segunda verificação utilizando um sensor magnético tipo pick-up, o qual segundo Korol (2015) tem a finalidade de gerar uma tensão pulsante quando um material ferromagnético passa em frente ao seu polo. O sinal esperado desse sensor para esse teste era uma onda com formato senoidal (Figura 34).

Figura 34. Sinal esperado do sensor magnético tipo pick-up.

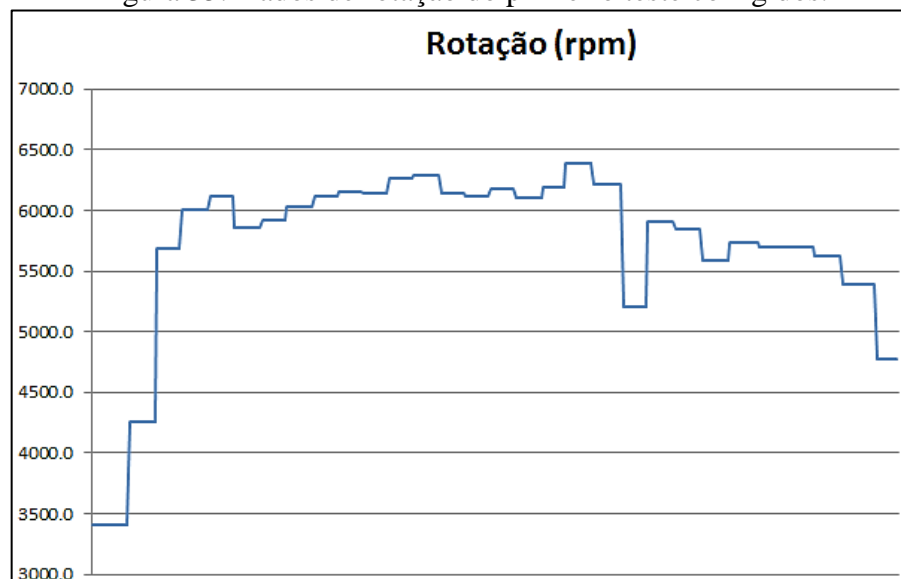


Fonte: Korol (2015).

Nesse momento é que foi visualizada a anomalia, já que o sensor apresentou um sinal pulsado de formato senoidal, porém apenas com um pico, e de mesma frequência que o sinal obtido com o sensor indutivo. Esses fatores deram evidência de que apenas um pulso estava sendo lido pelo sensor a cada rotação, ao invés dos 21 pulsos por rotação que estavam programados.

Dessa forma os valores de rotação obtidos no teste foram corrigidos sendo multiplicados por 21 para obter o valor real da rotação (Figura 35).

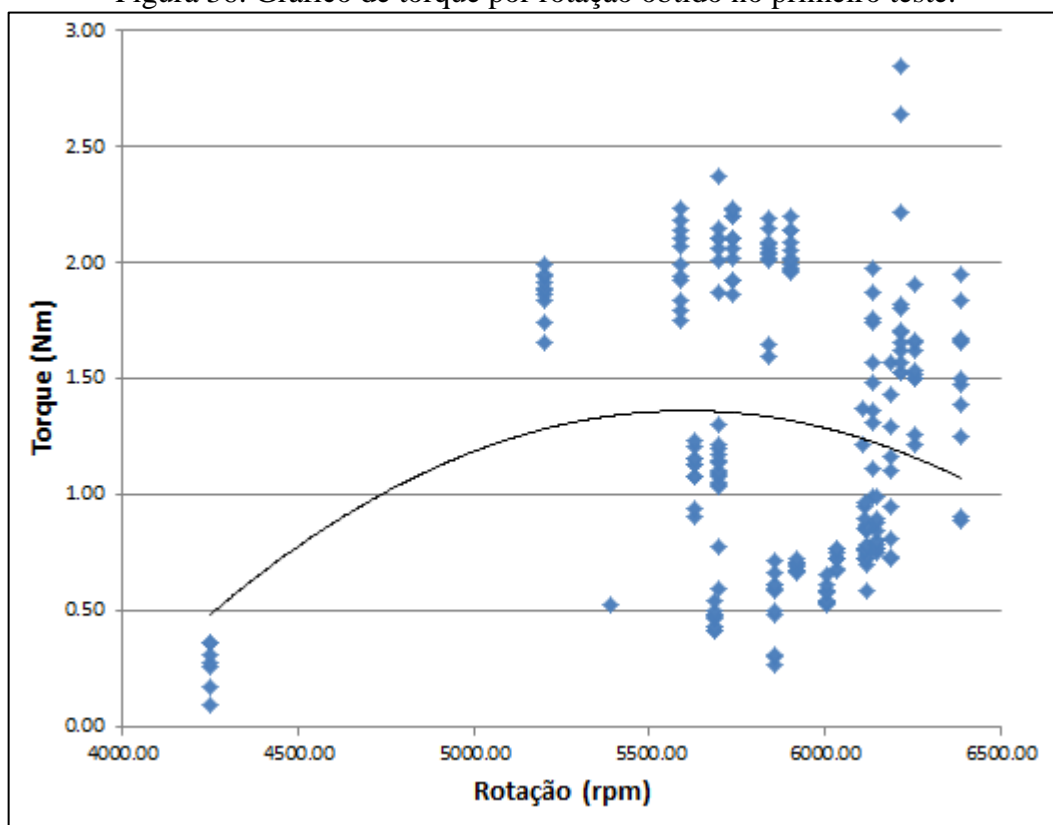
Figura 35. Dados de rotação do primeiro teste corrigidos.



Fonte: O autor (2016).

Na Figura 35 podem-se observar valores bastante coerentes para a rotação do motor. Tendo então os valores de rotação e torque, foram plotadas as curvas de torque (Figura 36) e potência (Figura 37) em função da rotação.

Figura 36. Gráfico de torque por rotação obtido no primeiro teste.

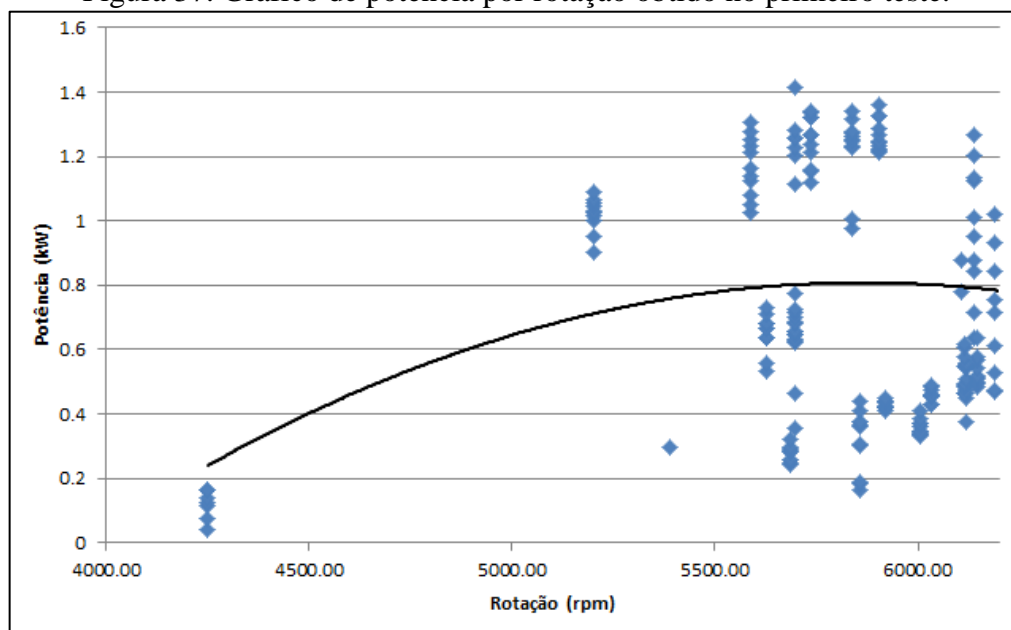


Fonte: O autor (2016).

Na Figura 36 foram plotados os dados de torque em função da rotação e adicionada a linha de tendência dos dados, a qual descreve aproximadamente a curva característica esperada para esse tipo de gráfico. Analisando em termos de magnitude de torque, têm-se valores aproximados com o valor que se espera, no qual um pico de 1,4Nm de torque ocorre próximo a 5500 rpm.

Entretanto os dados do teste não foram completamente representativos, já que existe uma dispersão bastante grande dos valores, além do fato de ter vários dados de torque associados a faixas de rotação. Essas faixas de rotação foram criadas pelo tempo que o sistema levou para obter um dado de rotação, já que a programação estava ajustada para fazer leitura de 105 pulsos para que fosse mandado o dado de rotação, e como foi comentado, estava sendo adquirido apenas um pulso por rotação nesse teste.

Figura 37. Gráfico de potência por rotação obtido no primeiro teste.



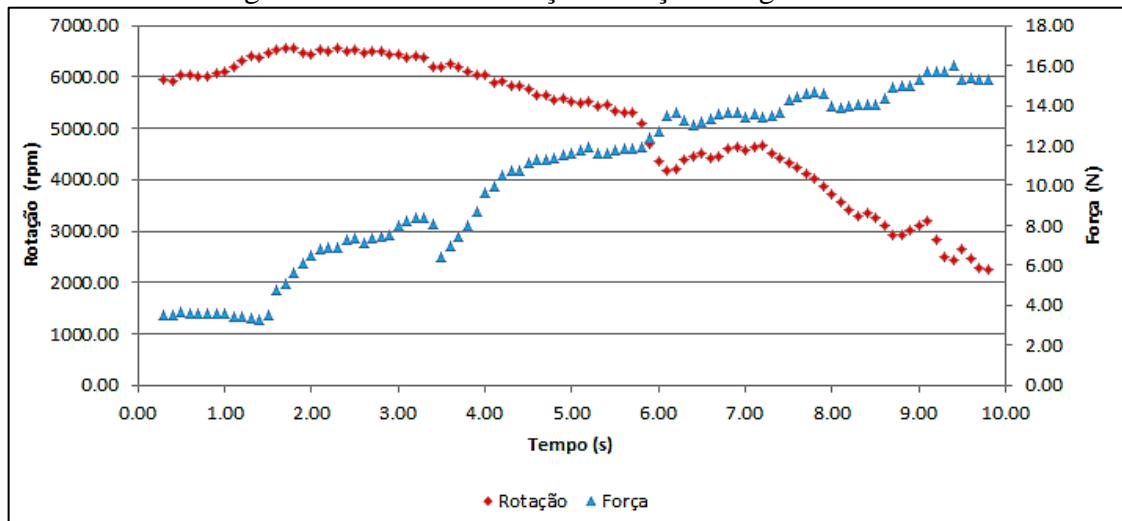
Fonte: O autor (2016).

No gráfico da Figura 37 é possível observar um comportamento característico desse tipo de curva, com um valor de 0,8kW com pico em torno de 6000 rpm. São valores aproximados ao que se espera, porém são dados dispersos e agrupados nos patamares de rotação, por isso não se tornam totalmente representativos.

4.3.2 Segundo teste

Para realização dos próximos testes foi corrigido o tratamento do dado de rotação, fazendo com que esse dado seja atualizado a cada três rotações do motor, dessa forma a taxa de atualização é maior para que os dados sejam associados com as leituras da célula de carga mais frequentemente. As curvas de força e rotação são apresentadas na Figura 38:

Figura 38. Curvas de rotação e força do segundo teste.



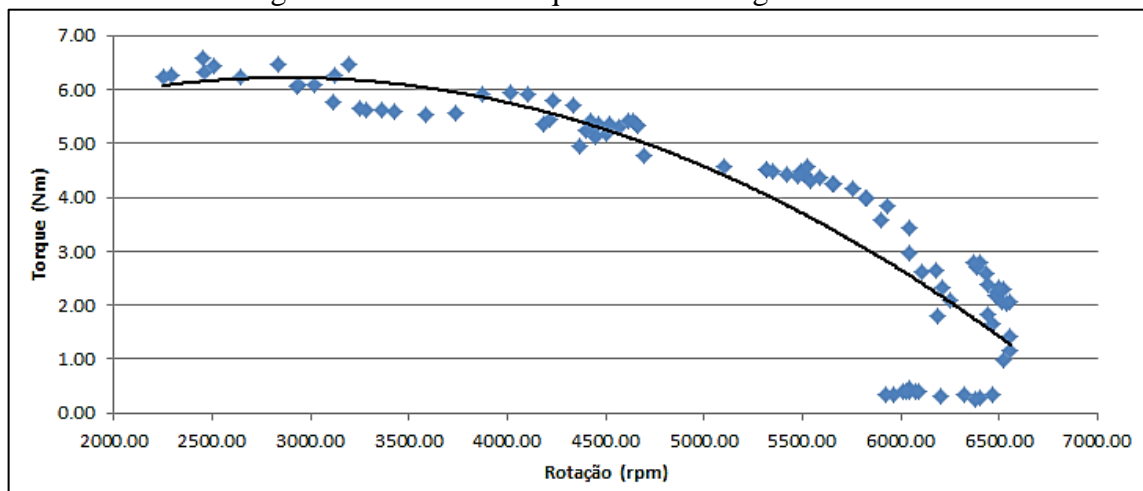
Fonte: O autor (2016).

Na figura 38 é possível observar que a rotação varia de forma suave durante o teste devido à correção feita na aquisição dos dados, obtendo os valores com maior frequência.

A força obtida é a leitura direta da célula de carga, ou seja, está sendo considerado o valor da força fornecida pelo motor somado ao peso do sistema, para extrair apenas o valor de força é descontado o valor de 2,8N dos dados.

Depois de realizada a correção da força nota-se que foram obtidos valores que ultrapassam os 12N. Esse valor é significativamente maior do que o esperado para o motor. Com os valores de força ultrapassando os 12N, tem-se um torque que ultrapassa os 6Nm.

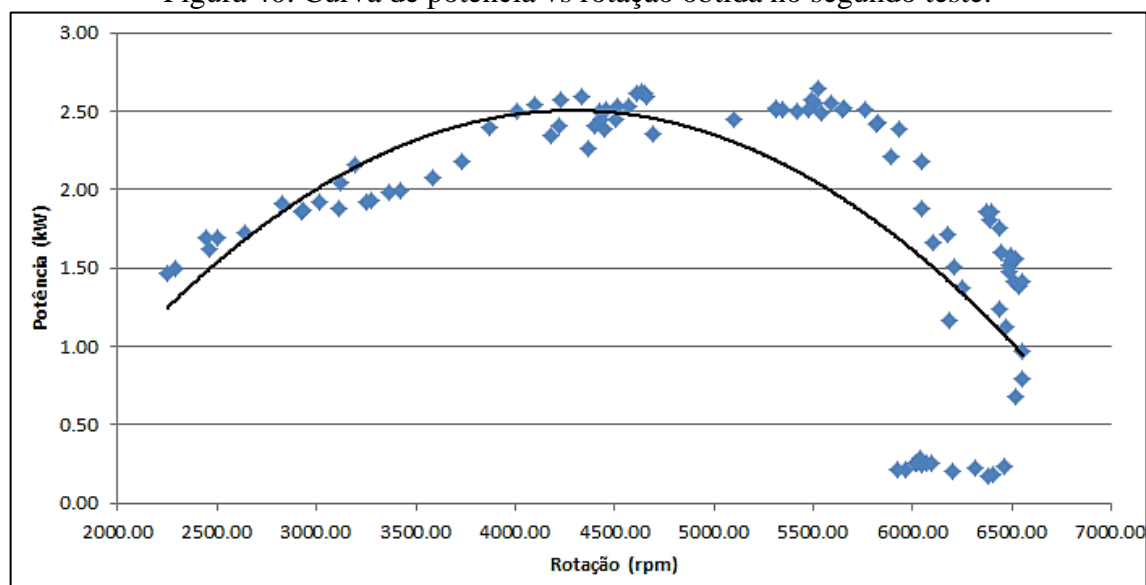
Figura 39. Curva de torque obtida no segundo teste.



Fonte: O autor (2016).

A Figura 39 representa de forma bastante adequada o formato esperado da curva, pois foi possível obter dados próximos à linha de tendência. Entretanto observa-se o pico de torque ocorrendo em torno dos 3000 rpm com magnitude de 6,2Nm.

Figura 40. Curva de potência vs rotação obtida no segundo teste.

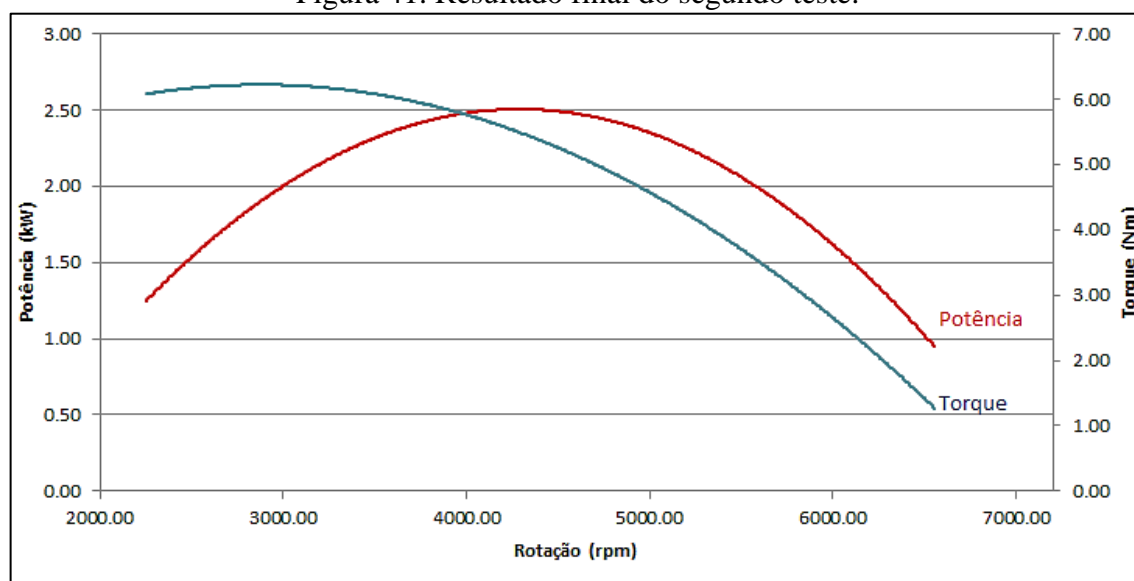


Fonte: O autor (2016).

Novamente observa-se um resultado adequado pela observação do formato da curva da Figura 40. Têm-se dados que se aproximam da curva de tendência com uma dispersão baixa, com pico em torno de 4500 rpm e com magnitude máxima de 2,5kW, valor esse acima do valor esperado.

O resultado final do teste é apresentado na Figura 41.

Figura 41. Resultado final do segundo teste.



Fonte: O autor (2016).

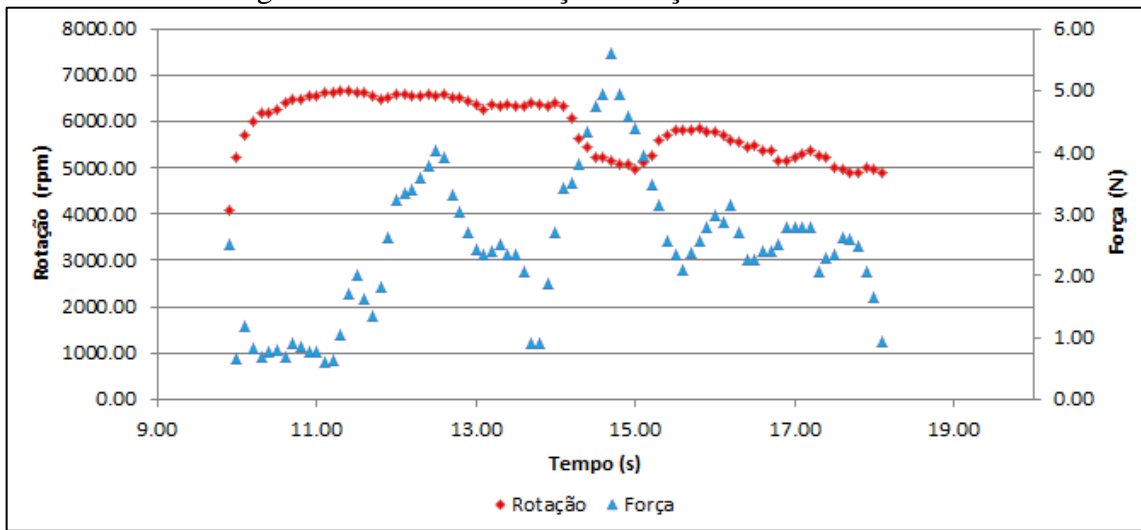
Apesar dos níveis de torque e potência estarem acima do esperado, foi possível gerar os gráficos com pontos bastante próximos às linhas de tendência e assim, acredita-se que o sistema foi capaz de extrair os dados do motor fazendo leituras plausíveis, as quais depois de associadas forneceram as curvas de tendência esperadas.

Acredita-se que a influência do operador é a razão principal pela qual os valores de torque e potência foram tão elevados em relação aos valores esperados. Durante a realização do teste houve uma força vertical aplicada pelo operador no conjunto de fricção, a qual se acrescentou à força fornecida pelo motor.

4.3.3 Terceiro teste

As curvas de rotação e força (Figura 42), torque (Figura 43) e potência (Figura 44) do terceiro teste são apresentadas a seguir.

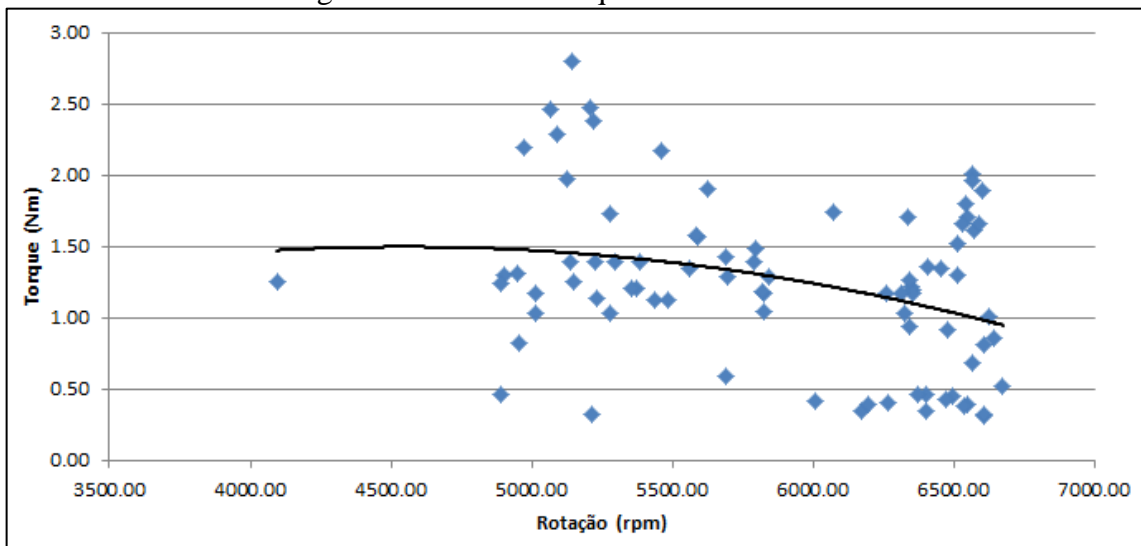
Figura 42. Curvas de rotação e força do terceiro teste.



Fonte: O autor (2016).

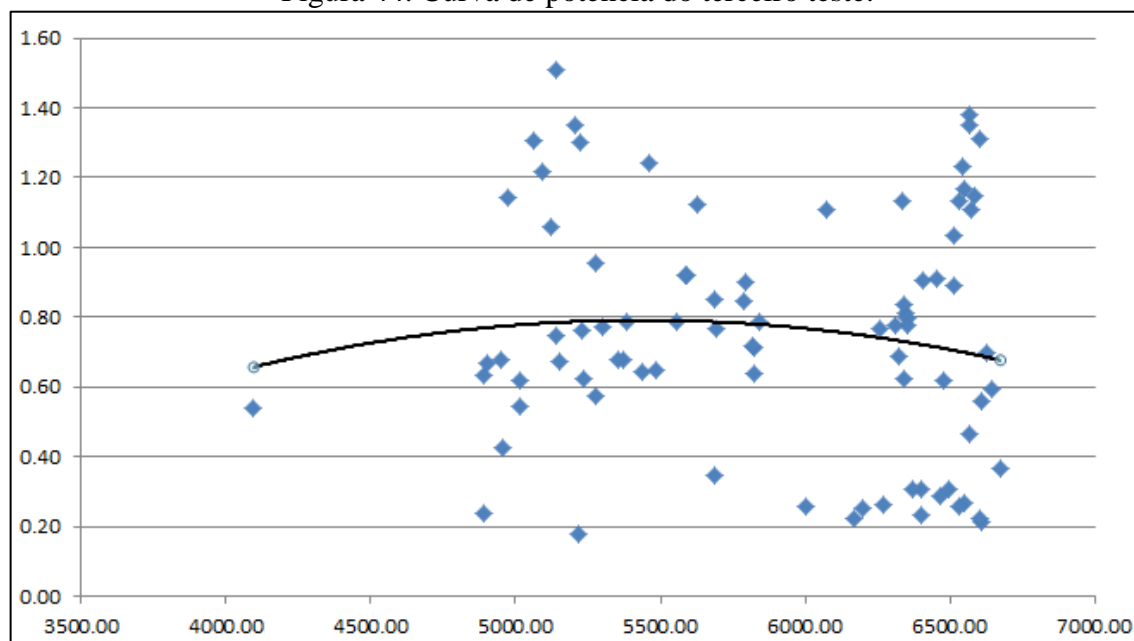
Na Figura 42 é possível observar a rotação decrescendo suavemente, porém a força sendo bastante variada. Um evento de destaque é o momento de 14s a 16s, no qual a força cresce ao seu máximo ao mesmo tempo em que a rotação tem uma queda significativa, efeito esse que mostra a correlação entre o torque aplicado pelo operador ao parafuso e a resposta de rotação do motor.

Figura 43. Curva de torque do terceiro teste.



Fonte: O autor (2016).

Figura 44. Curva de potência do terceiro teste.



Fonte: O autor (2016).

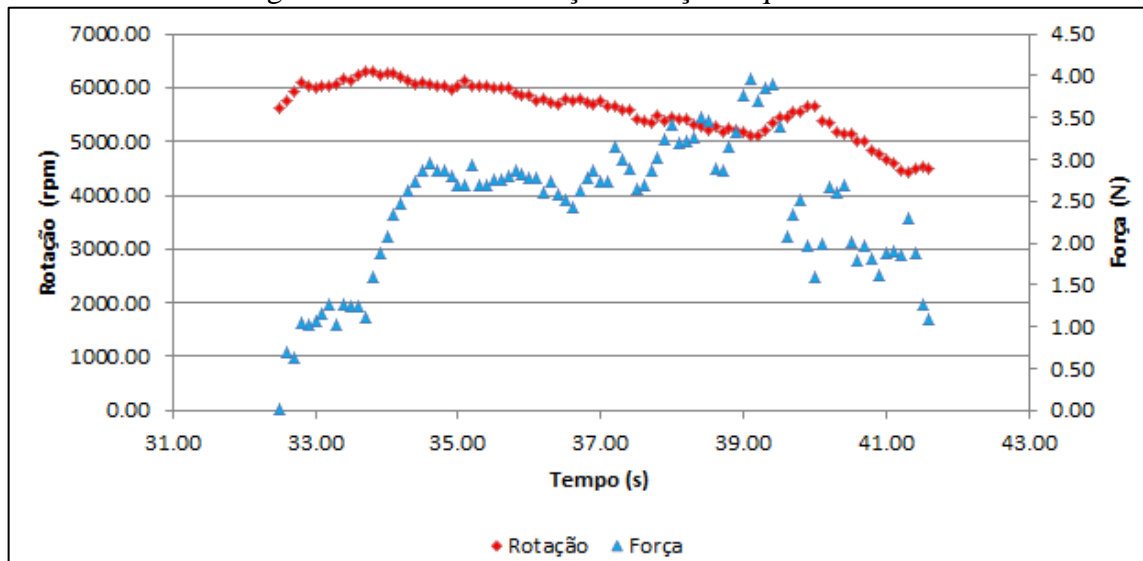
As curvas de torque e potência pela rotação, Figuras 43 e 44 respectivamente, estão em seus formatos esperados, porém esse teste não contemplou uma faixa de rotação tão abrangente quanto o segundo teste, ao mesmo tempo em que os dados foram bastante dispersos, por isso não foi possível observar com tanta clareza os picos de torque e potência nos gráficos.

Entretanto analisando-se em termos de magnitude dos valores temos dados concisos, uma vez que o pico de torque foi de 1,5 Nm a 4500 rpm e o pico de potência foi de 0,8 kW em 5500 rpm.

4.3.4 Quarto teste

Os dados gerados no quarto teste são apresentados nas figuras a seguir.

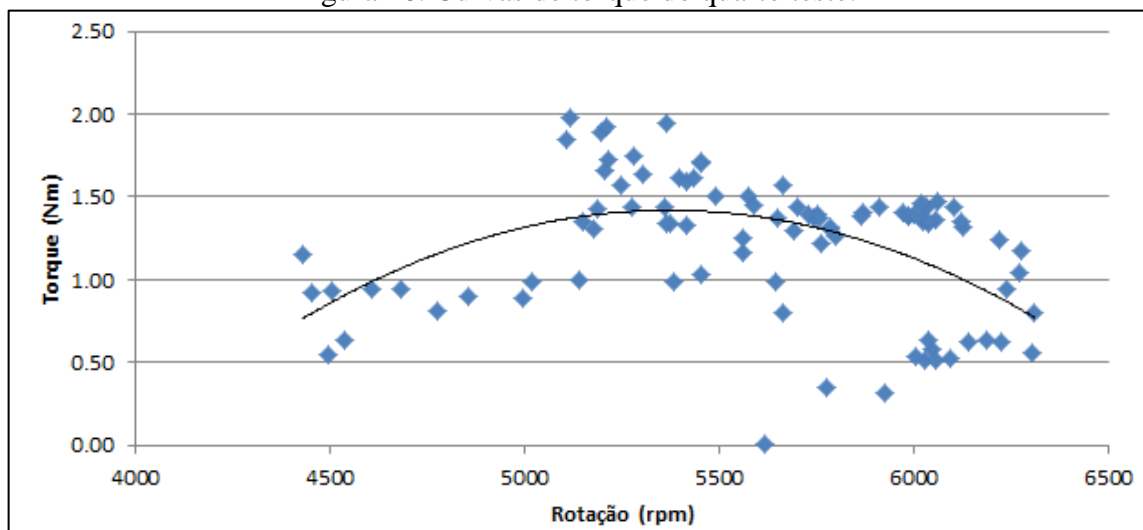
Figura 45. Curvas de rotação e força do quarto teste.



Fonte: O autor (2016).

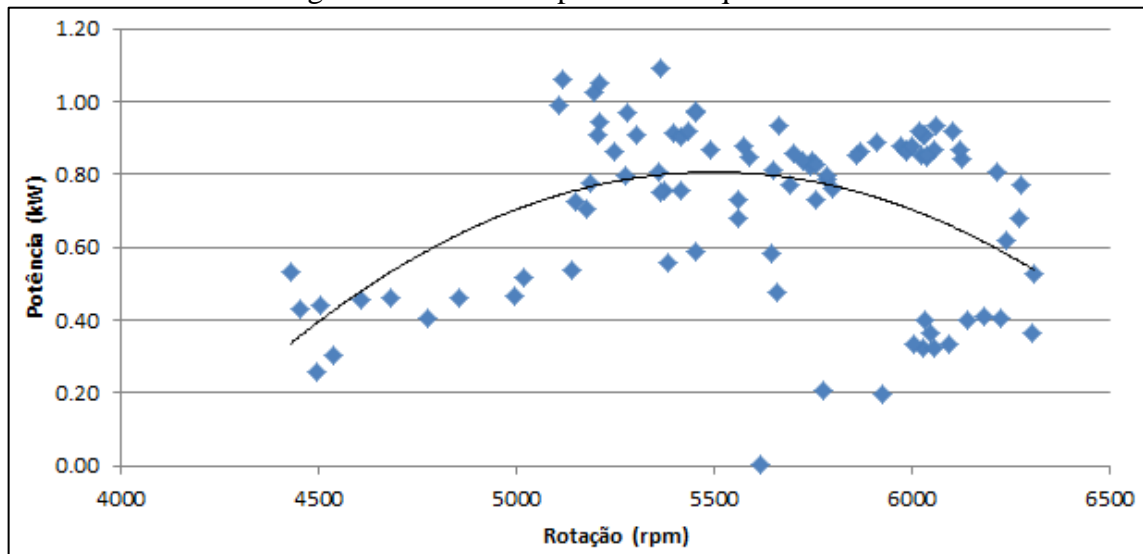
É possível observar na Figura 45 que existe uma variação grande nos dados de força medidos, enquanto a rotação decresce de maneira suave. Essa variação grande dos dados de força traz uma incerteza maior em relação aos dados reais do motor.

Figura 46. Curvas de torque do quarto teste.



Fonte: O autor (2016).

Figura 47. Curvas de potência do quarto teste.

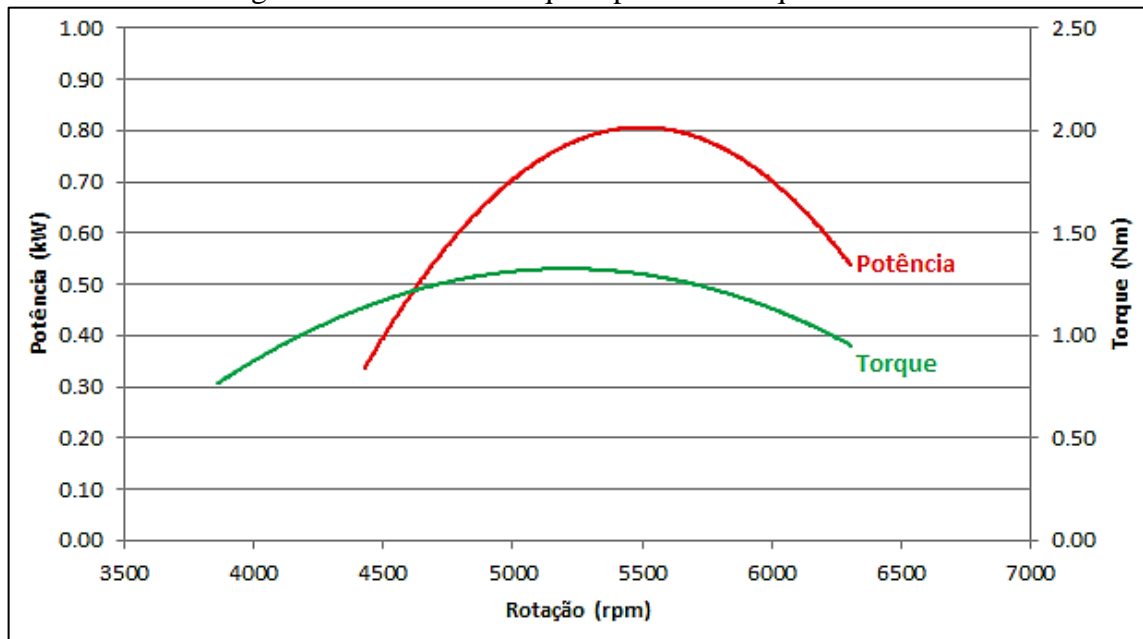


Fonte: O autor (2016).

Os dados de torque (Figura 46) e potência (Figura 47) mostram a variabilidade encontrada, porém é possível observar a mesma tendência da curva, sendo compatível com o formato esperado. Os valores indicam torque de 1,4 Nm entre 5000 e 5500 rpm e potência de 0,8 kW em 5500 rpm, dados esses compatíveis com o que é esperado do motor.

Finalmente as curvas finais obtidas com o quarto teste são apresentadas na figura 48.

Figura 48. Curvas de torque e potência do quarto teste.



Fonte: O autor (2016).

4.4 RESUMO E COMENTÁRIOS DOS TESTES

Nesse tópico é destacada a forma como foram desempenhados os testes. O sistema mecânico do dinamômetro teve que ser lubrificado com óleo SAE 10W30 e com graxa para realização dos testes por se tratar de um conjunto que sofre atrito mecânico direto entre peças metálicas, com isso a lubrificação contribui para suavizar a queda de rotação do motor durante o teste, diminui o desgaste das peças, evita o travamento repentino do motor e ainda proporciona refrigeração ao sistema, uma vez que o atrito aquece as peças do conjunto.

O primeiro teste foi realizado com o motor a quente e com o sistema lubrificado com óleo. O segundo teste ocorreu com o motor a quente e o sistema lubrificado com graxa. O terceiro teste foi realizado com o motor a quente e logo em seguida do segundo, ou seja, não houve nova lubrificação, da mesma forma que o quarto teste foi realizado logo em seguida do terceiro, não havendo nova lubrificação no sistema. Os parâmetros do teste são observados na Tabela 6:

Tabela 6. Resumo dos dados dos testes realizados.

Parâmetro	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Lubrificação	Óleo	Graxa	Graxa	Graxa
Temperatura	Quente	Quente	Quente	Quente
Rotação máxima	6400 rpm	6500 rpm	6600 rpm	6400 rpm
Rotação mínima	4700 rpm	2300 rpm	4900 rpm	4500 rpm
Torque máximo	1,4 Nm (5500rpm)	6,2 Nm (3000rpm)	1,5 Nm (4500rpm)	1,4 Nm (5000rpm)
Potência máxima	0,8 kW (6000rpm)	2,5 kW (4500rpm)	0,8 kW (5500rpm)	0,8 kW (5500rpm)

Fonte: O autor (2016).

Destaca-se o fato da variabilidade que ocorreu nas leituras de força dos testes 3 e 4, os quais foram realizados sem nova lubrificação, podendo haver correlação entre esses fatores. Observou-se ainda um melhor resultado quando foi utilizada graxa ao invés de óleo, fazendo com que fosse possível um melhor controle na frenagem do motor durante o teste.

5 CONCLUSÕES

O sistema de dinamômetro construído se mostrou capaz de gerar as curvas de torque e potência do motor testado conforme apresentado nos testes realizados, alcançando assim a proposta desse trabalho, porém novos testes são necessários para fazer a caracterização completa do motor.

O sistema mecânico é simples, de fácil construção e conta com poucos itens e todos de geometria simplificada, o que torna a construção rápida e de baixo custo, entretanto esse sistema é limitado a motores de pequeno porte devido ao princípio mecânico de extração de torque, o qual se dá exclusivamente via atrito mecânico entre as peças.

O sistema de aquisição de dados de força e de rotação foi capaz de capturar os dados necessários para geração de resultados satisfatórios, quando aplicada corretamente a metodologia de teste. Para otimização do sistema é necessário que se utilize um conversor A/D que forneça dados mais rapidamente, uma vez que o conversor HX711 utilizado fornece 10 dados por segundo. Como cada leitura de força é associada a uma leitura de rotação, temos muitos dados de rotação sendo perdidos.

Como recomendação para trabalhos futuros, para que haja uma melhor resolução dos dados, pode-se construir um sistema capaz de fazer associação de força a cada dado de rotação capturado. Uma solução proposta é a utilização de um conversor A/D que seja capaz de capturar e transmitir os dados com maior frequência.

Ainda como sugestão de trabalhos futuros, pode-se realizar um DOE (*design of experiments*) no sistema mecânico levantando os principais fatores que interferem na leitura de força da célula de carga, a fim de se caracterizar os fatores que contribuem com ruídos significativos. O operador e a lubrificação do sistema, por exemplo, são fatores que necessitam essa avaliação.

REFERÊNCIAS

AVIA SEMICONDUCTOR. **HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales**. Disponível em:
<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf>. Acesso em: 26 out. 2016.

BALLUFF. **Inductive sensor BES 516-325-G-S4-C**, 2012. Disponível em:
<www.balluff.com>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BECK, João Carlos Pinheiro; SILVA, Isaac Newton Lima da; HAUDE, José Roberto. **CÉLULA DE CARGA PARA MEDIÇÃO DE ESFORÇOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO**. Campina Grande: 2005.

BEVITORI, Alice Barreto. **Influência da pré-deformação plástica na microestrutura e propriedades de um aço inoxidável superduplex**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2010.

BRAGA, Newton C. **Como funcionam os Conversores A/D**. 2014. Disponível em:
<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/1508-conversores-ad>>. Acesso em: 12 out. 2016.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, 2012.

Células de Carga. Disponível em:
<[http://www.nccnat.com.br/assets/upload/noticia/9_1406279720.pdf?lightbox\[iframe\]=true&lightbox\[width\]=80p&lightbox\[height\]=90p](http://www.nccnat.com.br/assets/upload/noticia/9_1406279720.pdf?lightbox[iframe]=true&lightbox[width]=80p&lightbox[height]=90p)>. Acesso em: 11 out. 2016.

ÇENGEL, Yunus A; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. Lisboa: Mcgraw-hill Brasil, 2007.

CEZAR, Gustavo Vianna. **Desenvolvimento de uma Bancada de Testes para Motores a Combustão Interna**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

CONCEIÇÃO, Edcarlo da. **Apostila Instrumentação Industrial**. 2005. Disponível em:
<<http://pt.slideshare.net/jeff1989/apostila-de-instrumentaoindustrialsenai>>. Acesso em: 11 out. 2016.

CONWAY, Ken; DEHAAN, Michael. **UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)**. 2011. Disponível em:
<<http://whatis.techtarget.com/definition/UART-Universal-Asynchronous-Receiver-Transmitter>>. Acesso em: 26 out. 2016.

DS. **Sensor de rotação**: informativo técnico. Disponível em:
<http://www.ds.ind.br/media/linhas/08/04/1_5a90b7ebc955df71b2b3466f0abc28f6.pdf>. Acesso em: 29 out. 2016.

FERRO, Carlos André. **Injeção Eletrônica - Sensor de rotação e posição da árvore de manivelas**. Disponível em: <<http://www.ferromotor.com.br/2012/10/injecao-eletronica-aula-14-sensor-de.html>>. Acesso em: 29 out. 2016.

GONÇALVES, Júnior. **Qual a diferença entre Torque e potência?** 2013. Disponível em: <<http://dicasparacarros.blogspot.com.br/2013/06/qual-diferenca-entre-torque-e-potencia.html>>. Acesso em: 22 out. 2016.

GUPTA, Sachin; SADASIVAM, Kannan. **Weighing scale design—Measure signals accurately**. 2011. Disponível em: <http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279306>. Acesso em: 11 out. 2016.

HEYWOOD, John. Internal combustion engine fundamentals. United States of America: McGraw-Hill. 1988.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010

HONDA ENGINES. OWNER'S MANUAL. 2014

IWM - International Weighing Manufacture. **Spl – Célula De Carga Tipo Single Point**. Disponível em: <<http://www.iwm-brasil.com.br/spl-celula-de-carga-tipo-single-point/>>. Acesso em: 12 out. 2016.

KOROL, Daniel Rossi. **Monitoramento sem fio da vibração torsional de powertrain automotivo**. 2015. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/157235>>. Acesso em: 25 out. 2016.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. 4. ed. Porto: Publindústria, 2013.

MICROCONTROLADORES. Disponível em: <<http://www.roboliv.re/conteudo/microcontroladores>>. Acesso em: 12 out. 2016.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW**. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/pt/>>. Acesso em: 27 nov. 2016.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Medições de carga: Guia prático**. 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/tutorial/7138/pt/>>. Acesso em: 12 out. 2016.

NATIONAL INSTRUMENTS. **What is Serial Synchronous Interface (SSI)?** 2014. Disponível em: <http://digital.ni.com/public.nsf/websearch/862567530005F09C862566BE004E469D?opendocument&Submitted;&&node;=133020_US>. Acesso em: 26 out. 2016.

NOGUEIRA, Alexandre. **Placa Hx711 Adc 24-bit para Células De Carga**. 2015. Disponível em: <<http://dangerouselectron.blogspot.com.br/2015/06/hx711-adc-24-bit-para-celulas-de-carga.html>>. Acesso em: 12 out. 2016.

POSITAL FRABA. **IMPLEMENTATION OF SSI MASTER INTERFACE**. 2013. Disponível em:

<https://www.posital.com/media/posital_media/documents/AbsoluteEncoders_Context_Technology_SSI_AppNote.pdf>. Acesso em: 26 out. 2016.

PRADO, Sergio. **Primeiros passos com a Stellaris Launchpad**. 2012. Disponível em: <<https://sergioprado.org/primeiros-passos-com-a-stellaris-launchpad/>>. Acesso em: 21 out. 2016.

PUHLMANN, Henrique. **Trazendo o mundo real para dentro do processador - Conversor A/D**. 2015. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/conversor-a-d/>>. Acesso em: 12 out. 2016.

REDDY, S Bharadwaj. **Load Cell Working Principle**. 2016. Disponível em: <<http://instrumentationtools.com/load-cell-working-principle/>>. Acesso em: 17 out. 2016.

ROBOCORE. **Saída PWM com Arduíno**. Disponível em: <<https://www.robocore.net/modules.php?name=Forums&file=viewtopic&t=2847>>. Acesso em: 25 out. 2016.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci; LOPES, Guilherme Cano. **Sensor Indutivo : O que é e como funciona**. Disponível em: <<http://www.citisystems.com.br/sensor-indutivo/>>. Acesso em: 22 out. 2016.

TAVARES, Leonardo Gomes; CARSTENS, Luciano; VEIGA, Sérgio Luiz. **UTILIZAÇÃO DE PLATAFORMAS DE PROTOTIPAÇÃO BASEADAS EM MICROCONTROLADORES DE BAIXO CUSTO NO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE POSITIVO**. 2014. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge-2014/Artigos/129235.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. **Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE)**. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/ccstudio>>. Acesso em: 21 out. 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. **Technical Reference Manual: RM42x 16/32-Bit RISC Flash Microcontroller**. 2016. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/spnu516b/spnu516b.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2016.

TRIGO, Thiago. **Ensaio de Tração**. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/ensaio-de-tracao/>>. Acesso em: 17 out. 2016.

WSEPO. Disponível em: <http://www.wholesale-smallengineparts.com/products_new.html>. Acesso em: 01 nov. 2016.

APÊNDICE A – Códigos Do Microcontrolador

main.c

```

1  #include <stdint.h>
2  #include <stdbool.h>
3  #include "inc/hw_ints.h"
4  #include "inc/hw_memmap.h"
5  #include "inc/hw_types.h"
6  #include "driverlib/gpio.h"
7  #include "driverlib/ssi.h"
8  #include "driverlib/interrupt.h"
9  #include "driverlib/pin_map.h"
10 #include "driverlib/sysctl.h"
11 #include "driverlib/uart.h"
12 #include "driverlib/timer.h" //driver para os timers
13 #include "protocolo.h"
14
15 //variaveis globais
16
17 void TimerMedida(void)
18 {
19     uint32_t dataReceivedHX711[2];
20
21
22     TimerIntClear(TIMER0_BASE, TIMER_TIMA_TIMEOUT); //reseta a interrupção
23     SSIDataPutNonBlocking(SSIO_BASE, 0b10101010);
24     SysCtlDelay(SysCtlClockGet() / (10000 * 3));
25     SSIDataGetNonBlocking(SSIO_BASE, &dataReceivedHX711[0]);
26     SSIDataPutNonBlocking(SSIO_BASE, 0b10101010);
27     SysCtlDelay(SysCtlClockGet() / (10000 * 3));
28     SSIDataGetNonBlocking(SSIO_BASE, &dataReceivedHX711[1]);
29     SSIDisable(SSIO_BASE);
30     SSIConfigSetExpClk(SSIO_BASE, SysCtlClockGet(), SSI_FRF_MOTO_MODE_1,
31 SSI_MODE_MASTER, 100000, 11);
32     SSIEnable(SSIO_BASE);
33     SSIDataPutNonBlocking(SSIO_BASE, 0b10101010000);
34     SysCtlDelay(SysCtlClockGet() / (10000 * 3));
35     SSIDataGetNonBlocking(SSIO_BASE, &dataReceivedHX711[2]);
36     SSIDisable(SSIO_BASE);
37     SSIConfigSetExpClk(SSIO_BASE, SysCtlClockGet(), SSI_FRF_MOTO_MODE_1,
38 SSI_MODE_MASTER, 100000, 8);
39     SSIEnable(SSIO_BASE);
40
41     load_cell =
42 (dataReceivedHX711[0]<<16)|(dataReceivedHX711[1]<<8)|dataReceivedHX711[2];
43
44     if (status1 == 0)
45     {
46         GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_1);
47         status1 = 1;
48     }
49     else
50     {
51         GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1, 0x00);
52         status1 = 0;
53     }

```



```

54 }
55
56 void UARTIntHandler(void)
57 {
58     uint32_t ui32Status;
59     uint32_t temp_serial1;
60     ui32Status = UARTIntStatus(UART0_BASE, true); //get interrupt status
61     UARTIntClear(UART0_BASE, ui32Status); //clear the asserted interrupts
62     temp_serial1 = UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE);
63     TrataSerial (temp_serial1);
64
65 }
66
67 void SensorIntHandler(void)
68 {
69     int statusPortA = GPIOIntStatus(GPIO_PORTA_BASE, true);
70     GPIOIntClear(GPIO_PORTA_BASE, statusPortA);
71     StatusSistema ++;
72     contador++;
73
74     if (contador>=dentes)
75     {
76         time_interval = time_interval_last;
77         time_interval_last = TimerValueGet(TIMER1_BASE, TIMER_A);
78         time_interval = time_interval_last - time_interval;
79         contador = 0;
80
81         if (status2 == 0)
82         {
83             GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_2, GPIO_PIN_2);
84             status2 = 1;
85         }
86         else
87         {
88             GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_2, 0x00);
89             status2 = 0;
90         }
91     }
92
93 }
94
95 int main(void) {
96     uint8_t temp_serial;
97
98     SysCtlClockSet(SYSCTL_SYSDIV_4 | SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_XTAL_16MHZ |
99     SYSCTL_OSC_MAIN); //System clock: 40MHz //NAO MEXER
100     SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART0);
101     SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA);
102     SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOB);
103     SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOF);
104     GPIOPinConfigure(GPIO_PA0_U0RX);
105     GPIOPinConfigure(GPIO_PA1_U0TX);
106     GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);
107     //SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOF); //enable GPIO port for LED
108     GPIOPadConfigSet(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3,
109     GPIO_STRENGTH_2MA, GPIO_PIN_TYPE_STD);
110     GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3);
111     //enable pin for LED PF2

```

```

113     UARTConfigSetExpClk(UART0_BASE, SysCtlClockGet(), 115200,
114 (UART_CONFIG_WLEN_8 | UART_CONFIG_STOP_ONE | UART_CONFIG_PAR_NONE));
115     UARTEnable(UART0_BASE);
116     UARTIntEnable(UART0_BASE, UART_INT_RX); //only enable RX and TX interrupts
117     IntEnable(INT_UART0); //enable the UART interrupt
118     //UARTIntEnable(UART0_BASE, UART_INT_RX | UART_INT_RT); //only enable RX and
119 TX interrupts
120
121
122     SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_SSI0);
123     GPIOPinConfigure(GPIO_PA2_SSI0CLK);
124     GPIOPinConfigure(GPIO_PA5_SSI0TX);
125     GPIOPinConfigure(GPIO_PA4_SSI0RX);
126 //GPIOPinConfigure(GPIO_PB5_SSI2FSS);
127     GPIOPinTypeSSI(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5 | GPIO_PIN_2);
128
129     SSIConfigSetExpClk(SSI0_BASE, SysCtlClockGet(), SSI_FRF_MOTO_MODE_1,
130 SSI_MODE_MASTER, 100000, 8);
131     SSIEnable(SSI0_BASE);
132
133     /*****
134 *****/
135     /****Sinal
136 Sensor*****/
137     GPIOPadConfigSet(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7, GPIO_STRENGTH_2MA,
138 GPIO_PIN_TYPE_STD);
139     GPIOIntTypeSet(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7, GPIO_FALLING_EDGE);
140     GPIOIntRegister(GPIO_PORTA_BASE, SensorIntHandler);
141
142
143     /*****
144 *****/
145     /****Timer
146 0*****/
147     SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_TIMER0); //habilita o uso do Timer 0
148     TimerIntRegister (TIMER0_BASE, TIMER_A, TimerMedida);
149     TimerConfigure(TIMER0_BASE, TIMER_CFG_PERIODIC);
150     TimerLoadSet(TIMER0_BASE, TIMER_A, ((SysCtlClockGet()/10)-1));
151     IntEnable(INT_TIMER0A);
152     TimerIntEnable(TIMER0_BASE, TIMER_TIMA_TIMEOUT);
153     IntMasterEnable(); //enable processor interrupts
154     TimerEnable(TIMER0_BASE, TIMER_A);
155
156     /*****
157 *****/
158     /****Timer
159 1*****/
160     SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_TIMER1); //habilita o uso do Timer 0
161     TimerIntRegister (TIMER1_BASE, TIMER_A, TimerMedida);
162     TimerConfigure(TIMER1_BASE, TIMER_CFG_PERIODIC_UP);
163     TimerLoadSet(TIMER1_BASE, TIMER_A, 0xFFFFFFFF);
164     contador = 0;
165     dentes = 100;
166     GPIOIntEnable(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7);
167     TimerEnable(TIMER1_BASE, TIMER_A);
168
169
170     while (1) //let interrupt handler do the UART echo function
171 {

```

172 }
173 }

protocolo.c

```

1  /*
2   Trata protocolo e maquina virtual modo calibracao
3  */
4  #define protocolo_c
5
6  #include <stdint.h>
7  #include <stdbool.h>
8  #include "inc/hw_ints.h"
9  #include "inc/hw_memmap.h"
10 #include "inc/hw_types.h"
11 #include "driverlib/gpio.h"
12 #include "driverlib/ssi.h"
13 #include "driverlib/interrupt.h"
14 #include "driverlib/pin_map.h"
15 #include "driverlib/sysctl.h"
16 #include "driverlib/uart.h"
17 #include "driverlib/timer.h"
18 #include "protocolo.h"
19
20 // Variaveis Locais
21 uint8_t argumentos[7];
22 uint8_t crc;
23
24 enum _Comandos
25 {
26     AJUSTA_DENTES = 0,
27     DATA_ACQUIRE,
28     MUDA_MODO,
29 } comando;
30
31 // Funcoes Locais
32 void trataComandoRecebido ( void );
33
34 // Funcoes Globais
35 uint8_t TrataSerial( uint8_t dado )
36 {
37     uint8_t retorno = OK;
38     static uint8_t nArg,argIndex;
39
40     switch ( gProtocolState )
41     {
42     case LER_STX:
43         if ( dado == STX )
44         {
45             crc = dado;
46             gProtocolState = LER_COMANDO;
47         }
48         else
49             retorno = FAIL;
50         break;
51
52     case LER_COMANDO:
53
54         1         crc += dado;
55         2         comando = dado>>3;
56         3         nArg = dado&0x07;
57         4         argIndex = 0;
58         5

```

```

6      gProtocolState =(nArg==0)?LER_CRC:LER_ARGUMENTOS;
7      break;
8
9      case LER_ARGUMENTOS:
10         crc += dado;
11         --nArg;
12         argumentos[ argIndex ] = dado;
13         ++argIndex;
14         if ( nArg == 0 )
15             gProtocolState = LER_CRC;
16         break;
17
18         case LER_CRC:
19             if ( crc != dado )
20             {
21                 retorno = FAIL;
22                 gProtocolState = LER_STX;
23             }
24             else
25                 gProtocolState = LER_ETX;
26         break;
27
28         case LER_ETX:
29             if ( dado == ETX )
30             {
31                 //trata dados recebidos
32                 trataComandoRecebido();
33             }
34             else
35                 retorno = FAIL;
36             gProtocolState = LER_STX;
37         break;
38     }
39     return ( retorno );
40 }
41
42 void trataComandoRecebido ( void )
43 {
44
45     uint32_t load_cell_temp;
46     uint32_t time_interval_temp;
47
48     switch ( comando )
49     {
50
51         case AJUSTA_DENTES:
52             dentes = argumentos[0];
53             UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, StatusSistema); //echo character
54             break;
55
56         case DATA_ACQUIRE:
57             load_cell_temp = load_cell;
58             time_interval_temp = time_interval;
59             //LED1_ON;
60             UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, StatusSistema);
61             UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, ((load_cell_temp>>16)&0xFF));
62             UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, ((load_cell_temp>>8)&0xFF));
63             UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, ((load_cell_temp>>0)&0xFF));
64             UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, ((time_interval_temp>>24)&0xFF));

```

```
65     UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, ((time_interval_temp>>16)&0xFF));
66     UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, ((time_interval_temp>>8)&0xFF));
67     UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, ((time_interval_temp>>0)&0xFF));
68     break;
69
70 case MUDA_MODAL:
71     //altera modo operação
72     UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, StatusSistema);
73     break;
74
75 }
76 }
```